

METROLOGIA APLICADA A UM
MEDIDOR DIGITAL DE
PRESSÕES RESPIRATÓRIAS MÁXIMAS

José Leonardo Ferreira
BELO HORIZONTE, MG – BRASIL
ABRIL DE 2008

José Leonardo Ferreira

METROLOGIA APLICADA A UM
MEDIDOR DIGITAL DE
PRESSÕES RESPIRATÓRIAS MÁXIMAS

Dissertação submetida ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Julio Tierra-Criollo

Universidade Federal de Minas Gerais

Co-Orientador: Prof. Dr. Flávio Henrique Vasconcelos

Universidade Federal de Minas Gerais

ESCOLA DE ENGENHARIA

UFMG – 80 ANOS

(Folha de Aprovação, a ser anexada)

Não cometam injustiças no julgamento, nem cometam injustiças no peso e nas medidas. Tenham balanças, pesos e medidas exatas.

Lev. 19, 35-36

DEDICATÓRIA

A meus pais, Manoel e Leonor, verdadeiros Mestres na arte de ensinar e educar; verdadeiros pilares de amor e dedicação.

A vô, Luiz Eugênio, memória viva de grande pai carinhoso e dedicado.

A meu irmão, Manoel, a Tia Maria Natalícia, a Tia Leonice e ao primo Lu.

AGRADECIMENTOS

A Deus, fonte de vida, luz e bondade, que nos protege e nos dá força e sabedoria para seguirmos o caminho.

A meu orientador, Prof. Carlos Julio, pela enorme disponibilidade, apoio, confiança e incentivo, fundamentais para que este trabalho pudesse ter sido desenvolvido. A meu co-orientador, Prof. Flávio Vasconcelos, pelo importante apoio e pelas preciosas orientações técnicas.

Aos amigos do NEPEB, pelo companheirismo. Em especial à Nadja e ao Marconi que, com grande presteza e disponibilidade, me auxiliaram na coleta dos dados e no levantamento de informações relevantes para a elaboração do trabalho.

Às pessoas que contribuíram com uma parcela de ajuda bastante significativa, como o pessoal do CETEL/ SENAI/ FIEMG, representado nas pessoas do Marcus Vinicius, Luiz Henrique e Reiner, que emprestaram o laboratório para que as medições fossem realizadas. E a Rômulo Martini, da FHEMIG, pela força e pelas informações prestadas.

Ao pessoal do CPDEE e da UFMG, professores, alunos e funcionários que estiveram presentes na caminhada e que ajudaram a aliviar as agruras da caminhada.

Ao CNPq e à FAPEMIG, entidades financiadoras.

Por fim, a todas as pessoas que, de uma forma ou de outra, contribuíram para a realização deste. Muito obrigado, que Deus lhes recompense!

RESUMO

A confiabilidade de medição de um equipamento médico-hospitalar (EMH) é fundamental para a garantia do diagnóstico correto de uma doença. Uma avaliação errada causada tanto pela indicação do valor medido pelo instrumento como pela incerteza da medição pode comprometer a conduta a ser tomada com relação ao estado de saúde do paciente. Diante desse fato, o governo brasileiro vem esforçando-se em estabelecer uma série de medidas com o objetivo de regulamentar a fabricação, o comércio e a utilização dos EMH. Este trabalho apresenta o resultado da calibração de um sistema digital para medição das pressões respiratórias máximas (manovacuômetro digital), destacando-se o cálculo da incerteza de medição, desenvolvido pelo NEPEB (Núcleo de Estudos e Pesquisa em Engenharia Biomédica do Departamento de Engenharia Elétrica da UFMG). A análise de tais características metrológicas para o protótipo é importante para se verificar o grau de conformidade entre o comportamento do medidor e a normalização metrológica vigente no país, na hipótese desse equipamento vir ser utilizado em nível clínico e comercial. A calibração foi implementada utilizando-se protocolo do INMETRO que requer a apresentação da curva de calibração, que foi obtida por meio do ajuste linear pelo método dos mínimos quadrados ponderado (WLS). Dois modelos foram propostos para avaliação da incerteza da medição, um baseado na curva de calibração fornecida no *datasheet* do sensor de pressão utilizado pelo equipamento, outro com base na curva de calibração obtida por meio do ajuste WLS, a fim de se avaliar qual é o mais adequado à aplicação sob enfoque. O cálculo da incerteza de medição foi realizado com base no “Guia para a Expressão da Incerteza da Medição” – GUM, publicação da ISO e de outros organismos internacionais e de padronização ligados ao processo metrológico. Dois conjuntos de dados foram coletados em duas etapas, separadas por um intervalo de seis meses, e foram, então, utilizados para realização dos cálculos. Considerando-se os pontos de calibração levantados, verificou-se que o modelo obtido pelo ajuste linear WLS é mais apropriado para avaliação da incerteza de medição, estimada em torno de 1,4 a 1,5 kPa. A análise empreendida neste trabalho mostrou, ainda, que o manovacuômetro digital já pode ser utilizado em pesquisas e, posteriormente, poderá ser usado também em aplicações clínicas.

Palavras-chave: metrologia, calibração, incerteza da medição, medidor de pressões respiratórias máximas.

ABSTRACT

Reliable measurement in medical applications is fundamental for a correct final diagnosis of diseases. A wrong evaluated value, as for the equipment indication as for measurement uncertainty, can affect any decision about the health state of patient. Face this fact, Brazilian Government decided to set a group of documents and rules to normalize manufacturing, commerce and utilization of medical and hospital equipment (EMH). This work presents the calibration and the evaluation of the measurement uncertainty of a digital respiratory pressures measuring system (digital manovacuometer), developed by NEPEB (Biomedical Engineering Research & Development Laboratory of the Department of Electrical Engineering/Federal University of Minas Gerais). Analysis of such metrological characteristics of the prototype is an important requirement to verify if the equipment performance is in accordance with current EMH normalization in the country, since it could be used, in future, for clinical or commercial purposes. Calibration was carried out using a protocol established by Brazilian national metrology institute, INMETRO, and weighted least squares regression (WLS). Two models were built to evaluate uncertainty, one based on a calibration expression found on the datasheet of the pressure sensor used by the measurement system, other on the WLS implemented during calibration, to check the more adequate for the focused application. The guidelines employed to perform calculations of measurement uncertainty are given in the “Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement” – GUM, a publication by ISO and others international metrology and standard organizations. Two set of data were collected in different times, separated by six months, approximately, and then used to implement calculations. Considering a range of calibration points, it was found that results obtained by WLS modeling are more appropriate to evaluate the measurement uncertainty, estimated about 1.4 to 1.5 kPa. Moreover, metrological assessments of the digital manovacuometer evidenced that the measurement system could be used in research activities and, later, in clinical applications.

Keywords: *metrology, calibration, uncertainty measurement, maximum respiratory pressures measuring system.*

LISTA DE SIGLAS

| | | |
|----------|---|--|
| ABNT | - | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| ANVISA | - | Agência Nacional de Vigilância Sanitária |
| BIPM | - | <i>Bureau International des Poids et Mesures</i> |
| CIPM | - | <i>Comité International des Poids et Mesures</i> |
| CONMETRO | - | Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial |
| CGPM | - | <i>Conférence Général des Poids et Mesures</i> |
| EMH | - | Equipamento Médico-Hospitalar |
| FV | - | <i>Fuzzy Variables</i> (Variáveis Fuzzy) |
| GUM | - | <i>Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement</i> (Guia para a Expressão da Incerteza de Medição) |
| IEC | - | <i>International Electrotechnical Commission</i> |
| IFCC | - | <i>International Federation of Clinical Chemistry</i> |
| ILAC | - | <i>International Laboratory Accreditation Cooperation</i> |
| INMETRO | - | Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial |
| INPM | - | Instituto Nacional de Pesos e Medidas |
| INTI | - | Instituto Nacional de Tecnología Industrial |
| IPEM | - | Instituto Estadual de Pesos e Medidas |
| ISO | - | <i>Internacional Organization for Standardization</i> |
| IUPAC | - | <i>International Union of Pure and Applied Chemistry</i> |
| IUPAP | - | <i>Union of Pure and Applied Physics</i> |
| JCGM | - | <i>Joint Commitee for Guides in Metrology</i> (Comitê Conjunto para Guias em Metrologia) |
| LS | - | <i>Least Squares</i> (Mínimos Quadrados) |
| MS | - | Ministério da Saúde |
| NEPEB | - | Núcleo de Estudos e Pesquisa em Engenharia Biomédica da Escola de Engenharia da UFMG |
| NIST | - | <i>National Institute of Standards and Technology</i> |
| NMI | - | <i>National Metrology Institute</i> (Instituto Nacional de Metrologia) |
| OIML | - | <i>International Organization of Legal Metrology</i> |

| | | |
|----------|---|---|
| pdf | - | <i>Probability Density Function</i> (Função Densidade de Probabilidade) |
| PTB | - | <i>Physikalisch-Technische Bundesanstalt</i> |
| RBC | - | Rede Brasileira de Calibração |
| RMMG | - | Rede Metrológica de Minas Gerais |
| RFV | - | <i>Random-Fuzzy Variables</i> (Variáveis Fuzzy-Aleatórias) |
| SBM | - | Sociedade Brasileira de Metrologia |
| SI | - | Sistema Internacional de Unidades |
| SINMETRO | - | Sistema Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial |
| VIM | - | Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia |
| WLS | - | <i>Weighted Least Squares</i> (Mínimos Quadrados Ponderado) |

LISTA DE DEFINIÇÕES MATEMÁTICAS

X_j = Grandeza de entrada da relação funcional f ou leitura na saída do medidor

Y = Mensurando, grandeza de saída da relação funcional f ou resultado da medição

(X_j, Y_j) = Ponto de calibração

x_j = Estimativa de X_j

y = Estimativa de Y

$a_1...a_N$ = Parâmetros do modelo

a = Inclinação do modelo linear

b = Intercepto do modelo linear

N = Número de objetos

n = Número de observações

J = Número de pontos de calibração

u = Incerteza de medição

μ = Valor esperado de uma aleatória q

σ = Desvio padrão de uma variável aleatória q

q_m = Média aritmética ou estimativa do valor esperado de uma variável aleatória q

s = Estimativa do desvio padrão

χ^2 = Função qui-quadrada

$Var(q)$ = Variância de uma variável aleatória q

$Cov(p, q) = u(p, q)$ = Covariância de uma variável aleatória p em relação a uma variável aleatória q

k = Fator de abrangência usado para calcular a incerteza expandida $U = ku_c(y)$ da estimativa do valor medido pelo medidor

$\frac{\partial f}{\partial x_i}$ = Derivada parcial da relação funcional f com respeito a x_i

ν = Número de graus de liberdade

ν_{eff} = Número de graus de liberdade efetivos

Bi = Razão de Birge

P_r = Pressão de referência aplicada ao manovacuômetro digital

V_m = Tensão lida/coletada na saída do manovacuômetro digital

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 2.1: Representação do processo de medição juntamente com os cinco agentes que o compõem – modificado de FERRERO E SALICONE (2006)..... | 10 |
| Figura 2.2: Exatidão e precisão (CARVALHO, 2004). | 19 |
| Figura 2.3: Exemplo da determinação do intervalo de cobertura de um dada pdf: X_m é a média e σ , o desvio padrão – modificado após FERRERO E SALICONE (2006)..... | 27 |
| Figura 2.4: Exemplo da determinação da incerteza padrão para uma pdf uniforme de uma medição, dado um intervalo de cobertura – modificado após FERRERO E SALICONE (2006). | 27 |
| Figura 3.1: Manovacuômetro digital desenvolvido pelo NEPEB (MARCONI <i>et al.</i> , 2007). À esquerda, o módulo de aquisição analógico de pressão; à direita, o módulo de conversão A/D. | 39 |
| Figura 3.2: Sensor MPX5050 da FREESCALE..... | 40 |
| Figura 3.3: Utilização dos sensores para medição de P _E max e P _I max. S1: sensor 1; S2: sensor 2 – modificado de SILVA (2006)..... | 40 |
| Figura 3.4: Etapas desde a aquisição do sinal analógico até sua exibição no programa de interface com o usuário na tela do micro. Tx: transmissão; Rx: recepção. | 42 |
| Figura 3.5: Esquema da montagem implementada para realização da calibração do protótipo. | 44 |
| Figura 4.1: Curvas médias de calibração (subida e descida) para o sensor 1..... | 50 |
| Figura 4.2: Curvas médias de calibração (subida e descida) para o sensor 2..... | 50 |
| Figura 4.3: Pontos de calibração e curva estimada pelo modelo baseado na equação (eq.) fornecida pelo fabricante e incertezas associadas, para o sensor 1 (curva de subida). (+): pontos de calibração; (P_{es}): curva estimada de pressão pelo modelo, resultante de (4.5) e; ($P_{es} + U_{pl}$ e $P_{es} - U_{pl}$): curva estimada associada com a incerteza expandida..... | 59 |
| Figura 4.4: Pontos de calibração e curva estimada pelo modelo baseado na equação (eq.) fornecida pelo fabricante e incertezas associadas, para o sensor 1 (curva de descida). (+): pontos de calibração; (P_{es}): curva estimada de pressão pelo modelo, resultante de (4.5) e; ($P_{es} + U_{pl}$ e $P_{es} - U_{pl}$): curva estimada associada com a incerteza expandida. | 59 |
| Figura 4.5: Pontos de calibração e curva estimada pelo modelo baseado na equação (eq.) fornecida pelo fabricante e incertezas associadas, para o sensor 2 (curva de subida). (+): pontos de calibração; (P_{es}): curva estimada de pressão pelo modelo, resultante de (4.5) e; ($P_{es} + U_{pl}$ e $P_{es} - U_{pl}$): curva estimada associada com a incerteza expandida..... | 60 |
| Figura 4.6: Pontos de calibração e curva estimada pelo modelo baseado na equação (eq.) fornecida pelo fabricante e incertezas associadas, para o sensor 2 (curva de descida). (+): pontos de calibração; (P_{es}): curva estimada de pressão pelo modelo, resultante de (4.5) e; ($P_{es} + U_{pl}$ e $P_{es} - U_{pl}$): curva estimada associada com a incerteza expandida. | 60 |
| Figura 4.7: Pontos de calibração e curva estimada pelo modelo baseado nos mínimos quadrados ponderado (WLS) e incertezas associadas, para o sensor 1 (curva de subida). (+): | |

pontos de calibração; (P_{es}): curva estimada de pressão pelo modelo resultante do ajuste linear e; ($P_{es} + U_{p2}$ e $P_{es} - U_{p2}$): curva estimada associada com a incerteza expandida. 63

Figura 4.8: Pontos de calibração e curva estimada pelo modelo baseado nos mínimos quadrados ponderado (WLS) e incertezas associadas, para o sensor 1 (curva de descida). (+): pontos de calibração; (P_{es}): curva estimada de pressão pelo modelo resultante do ajuste linear e; ($P_{es} + U_{p2}$ e $P_{es} - U_{p2}$): curva estimada associada com a incerteza expandida. 63

Figura 4.9: Pontos de calibração e curva estimada pelo modelo baseado nos mínimos quadrados ponderado (WLS) e incertezas associadas, para o sensor 2 (curva de subida). (+): pontos de calibração; (P_{es}): curva estimada de pressão pelo modelo resultante do ajuste linear e; ($P_{es} + U_{p2}$ e $P_{es} - U_{p2}$): curva estimada associada com a incerteza expandida. 64

Figura 4.10: Pontos de calibração e curva estimada pelo modelo baseado nos mínimos quadrados ponderado (WLS) e incertezas associadas, para o sensor 2 (curva de descida). (+): pontos de calibração; (P_{es}): curva estimada de pressão pelo modelo resultante do ajuste linear e; ($P_{es} + U_{p2}$ e $P_{es} - U_{p2}$): curva estimada associada com a incerteza expandida. 64

Figura 4.11: Pontos de calibração e curva estimada pelo modelo baseado na equação (eq.) fornecida pelo fabricante e incertezas associadas, para o sensor 1 (curva de subida). (+): pontos de calibração; (P_{es}): curva estimada de pressão pelo modelo, resultante de (4.5) e; ($P_{es} + U_{p1}$ e $P_{es} - U_{p1}$): curva estimada associada com a incerteza expandida. 70

Figura 4.12: Pontos de calibração e curva estimada pelo modelo baseado na equação (eq.) fornecida pelo fabricante e incertezas associadas, para o sensor 1 (curva de descida). (+): pontos de calibração; (P_{es}): curva estimada de pressão pelo modelo, resultante de (4.5) e; ($P_{es} + U_{p1}$ e $P_{es} - U_{p1}$): curva estimada associada com a incerteza expandida. 70

Figura 4.13: Pontos de calibração e curva estimada pelo modelo baseado na equação (eq.) fornecida pelo fabricante e incertezas associadas, para o sensor 2 (curva de subida). (+): pontos de calibração; (P_{es}): curva estimada de pressão pelo modelo, resultante de (4.5) e; ($P_{es} + U_{p1}$ e $P_{es} - U_{p1}$): curva estimada associada com a incerteza expandida. 71

Figura 4.14: Pontos de calibração e curva estimada pelo modelo baseado na equação (eq.) fornecida pelo fabricante e incertezas associadas, para o sensor 2 (curva de descida). (+): pontos de calibração; (P_{es}): curva estimada de pressão pelo modelo, resultante de (4.5) e; ($P_{es} + U_{p1}$ e $P_{es} - U_{p1}$): curva estimada associada com a incerteza expandida. 71

Figura 4.15: Pontos de calibração e curva estimada pelo modelo baseado nos mínimos quadrados ponderado (WLS) e incertezas associadas, para o sensor 1 (curva de subida). (+): pontos de calibração; (P_{es}): curva estimada de pressão pelo modelo resultante do ajuste linear e; ($P_{es} + U_{p2}$ e $P_{es} - U_{p2}$): curva estimada associada com a incerteza expandida. 72

Figura 4.16: Pontos de calibração e curva estimada pelo modelo baseado nos mínimos quadrados ponderado (WLS) e incertezas associadas, para o sensor 1 (curva de descida). (+): pontos de calibração; (P_{es}): curva estimada de pressão pelo modelo resultante do ajuste linear e; ($P_{es} + U_{p2}$ e $P_{es} - U_{p2}$): curva estimada associada com a incerteza expandida. 73

Figura 4.17: Pontos de calibração e curva estimada pelo modelo baseado nos mínimos quadrados ponderado (WLS) e incertezas associadas, para o sensor 2 (curva de subida). (+): pontos de calibração; (P_{es}): curva estimada de pressão pelo modelo resultante do ajuste linear e; ($P_{es} + U_{p2}$ e $P_{es} - U_{p2}$): curva estimada associada com a incerteza expandida. 73

Figura 4.18: Pontos de calibração e curva estimada pelo modelo baseado nos mínimos quadrados ponderado (WLS) e incertezas associadas, para o sensor 2 (curva de descida). (+):

pontos de calibração; (P_{es}): curva estimada de pressão pelo modelo resultante do ajuste linear e; ($P_{es} + U_{p2}$ e $P_{es} - U_{p2}$): curva estimada associada com a incerteza expandida. 74

Figura 4.19: Confrontação dos pontos de calibração do primeiro conjunto de dados com a curva estimada pelo modelo baseado nos mínimos quadrados ponderado (WLS) e incertezas associadas a partir do segundo grupo de dados, para o sensor 1 (curva de subida). (+): pontos de calibração coletados em out/2007; (P_{es}): curva de pressão estimada pelo modelo baseado nos dados de abr/2007; ($P_{es} + U_{p2}$ e $P_{es} - U_{p2}$): curva estimada associada com a incerteza expandida. 75

Figura 4.20: Confrontação dos pontos de calibração do primeiro conjunto de dados com a curva estimada pelo modelo baseado nos mínimos quadrados ponderado (WLS) e incertezas associadas a partir do segundo grupo de dados, para o sensor 1 (curva de descida). (+): pontos de calibração coletados em out/2007; (P_{es}): curva de pressão estimada pelo modelo baseado nos dados de abr/2007; ($P_{es} + U_{p2}$ e $P_{es} - U_{p2}$): curva estimada associada com a incerteza expandida. 75

Figura 4.21: Confrontação dos pontos de calibração do primeiro conjunto de dados com a curva estimada pelo modelo baseado nos mínimos quadrados ponderado (WLS) e incertezas associadas a partir do segundo grupo de dados, para o sensor 2 (curva de subida). (+): pontos de calibração coletados em out/2007; (P_{es}): curva de pressão estimada pelo modelo baseado nos dados de abr/2007; ($P_{es} + U_{p2}$ e $P_{es} - U_{p2}$): curva estimada associada com a incerteza expandida. 76

Figura 4.22: Confrontação dos pontos de calibração do primeiro conjunto de dados com a curva estimada pelo modelo baseado nos mínimos quadrados ponderado (WLS) e incertezas associadas a partir do segundo grupo de dados, para o sensor 2 (curva de descida). (+): pontos de calibração coletados em out/2007; (P_{es}): curva de pressão estimada pelo modelo baseado nos dados de abr/2007; ($P_{es} + U_{p2}$ e $P_{es} - U_{p2}$): curva estimada associada com a incerteza expandida. 76

Figura 5.1: Diferença de pressão estimada pelo modelo WLS e pelo modelo baseado na equação do *datasheet* do sensor (eq.), considerando-se a curva de subida do sensor 1 (dados de out/2007). 78

Figura 5.2: Diferença de pressão estimada pelo modelo WLS e pelo modelo baseado na equação do *datasheet* do sensor (eq.), considerando-se a curva de descida do sensor 2 (dados de abr/2007). 79

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 2.1: As sete unidades de base do Sistema Internacional de Unidades (INMETRO, 2005)..... | 8 |
| Tabela 3.1: Características do sensor MPX5050 (FREESCALE, 2004)..... | 39 |
| Tabela 3.2: Valores de pressão aplicados ao medidor..... | 45 |
| Tabela 4.1: Pressão de referência, tensão lida na saída do medidor e incertezas associadas (sensor 1 – curva de subida). | 51 |
| Tabela 4.2: Pressão de referência, tensão lida na saída do medidor e incertezas associadas (sensor 1 – curva de descida)..... | 52 |
| Tabela 4.3: Pressão de referência, tensão lida na saída do medidor e incertezas associadas (sensor 2 – curva de subida). | 52 |
| Tabela 4.4: Pressão de referência, tensão lida na saída do medidor e incertezas associadas (sensor 2 – curva de descida)..... | 53 |
| Tabela 4.5: Parâmetros a e b , suas incertezas associadas u_a e u_b e covariância $Cov(a,b)$ | 53 |
| Tabela 4.6: Razão de Birge para as curvas dos sensores 1 e 2, referentes aos dados de abr/2007..... | 55 |
| Tabela 4.7: Incerteza expandida para todos os pontos de calibração – usando-se a expressão obtida do <i>datasheet</i> do sensor..... | 58 |
| Tabela 4.8: Incerteza expandida para todos os pontos de calibração – usando-se a expressão obtida por meio do ajuste linear por mínimos quadrados ponderado..... | 62 |
| Tabela 4.9: Pressão de referência, tensão lida na saída do medidor e incertezas associadas (sensor 1 – curva de subida). | 66 |
| Tabela 4.10: Pressão de referência, tensão lida na saída do medidor e incertezas associadas (sensor 1 – curva de descida)..... | 66 |
| Tabela 4.11: Pressão de referência, tensão lida na saída do medidor e incertezas associadas (sensor 2 – curva de subida). | 67 |
| Tabela 4.12: Pressão de referência, tensão lida na saída do medidor e incertezas associadas (sensor 2 – curva de descida)..... | 67 |
| Tabela 4.13: Parâmetros a e b , suas incertezas associadas u_a e u_b e covariância $Cov(a,b)$ | 68 |
| Tabela 4.14: Razão de Birge para as curvas dos sensores 1 e 2 referentes aos dados de out/2007..... | 68 |
| Tabela 4.15: Incerteza expandida para todos os pontos de calibração – usando-se a expressão obtida do <i>datasheet</i> do sensor..... | 69 |

SUMÁRIO

| | |
|--|------|
| DEDICATÓRIA..... | v |
| AGRADECIMENTOS..... | vi |
| RESUMO..... | vii |
| ABSTRACT..... | viii |
| LISTA DE SIGLAS..... | ix |
| LISTA DE DEFINIÇÕES MATEMÁTICAS..... | xi |
| LISTA DE FIGURAS..... | xii |
| LISTA DE TABELAS..... | xv |
| SUMÁRIO..... | xvi |
| CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1 Objetivos..... | 4 |
| 1.2 Estrutura do Trabalho..... | 5 |
| CAPÍTULO II – METROLOGIA, CALIBRAÇÃO E INCERTEZA DA MEDIÇÃO..... | 6 |
| 2.1 Metrologia e Medição..... | 6 |
| 2.2 Calibração e Rastreabilidade..... | 12 |
| 2.2.1 Calibração pelo método dos mínimos quadrados ponderado (WLS)..... | 13 |
| 2.3 Incerteza da Medição, Erro, Precisão e Exatidão..... | 17 |
| 2.4 Expressão da Incerteza da Medição..... | 19 |
| 2.4.1 Definições do GUM referentes à avaliação da incerteza da medição..... | 21 |
| 2.4.1.1 Incerteza do Tipo A..... | 22 |
| 2.4.1.2 Incerteza do Tipo B..... | 23 |
| 2.4.1.3 Função densidade de probabilidade (pdf) e intervalo de cobertura..... | 24 |
| 2.4.1.4 Incerteza padrão combinada..... | 28 |
| 2.4.1.5 Incerteza padrão expandida..... | 30 |
| 2.4.2 Outros aspectos importantes relacionados à avaliação da incerteza da medição..... | 32 |
| 2.4.2.1 Suplemento 1 do GUM..... | 33 |
| 2.4.2.2 Inferência bayesiana..... | 34 |
| 2.4.2.3 Variáveis fuzzy e variáveis fuzzy-aleatórias..... | 35 |
| CAPÍTULO III – MATERIAIS E MÉTODOS..... | 36 |
| 3.1 O Equipamento do NEPEB sob Avaliação Metrológica: o Medidor Digital de Pressões Respiratórias..... | 36 |
| 3.1.1 O módulo de aquisição analógico de pressão..... | 39 |
| 3.1.2 O módulo de conversão A/D do sinal de tensão..... | 41 |

| | |
|--|-----|
| 3.2 Metodologia Utilizada para Calibração e Cálculo da Incerteza da Medição | 42 |
| 3.2.1 <i>Protocolo utilizado para calibração do manovacuômetro</i> | 43 |
| 3.2.1.1 <i>Levantamento dos pontos de calibração</i> | 43 |
| 3.2.1.2 <i>Método usado para calibração do manovacuômetro</i> | 46 |
| 3.2.2 <i>Protocolo utilizado para cálculo da incerteza de medição</i> | 47 |
| 3.2.3 <i>O instrumento calibrado utilizado como referência</i> | 48 |
| CAPÍTULO IV – RESULTADOS | 49 |
| 4.1 Resultados Obtidos para o Primeiro Conjunto de Dados Levantados (Abril de 2007) .. | 49 |
| 4.1.1 <i>Curvas de calibração obtidas para o protótipo pelo método dos mínimos quadrados ponderado</i> | 49 |
| 4.1.1.1 <i>Cálculo de parâmetros e incertezas do modelo</i> | 49 |
| 4.1.1.2 <i>Análise de consistência do modelo</i> | 54 |
| 4.1.2 <i>Cálculo da incerteza de medição para o manovacuômetro desenvolvido</i> | 55 |
| 4.1.2.1 <i>Avaliação da incerteza utilizando-se a expressão fornecida no datasheet do sensor</i> | 55 |
| 4.1.2.2 <i>Avaliação da incerteza utilizando-se a expressão obtida durante a calibração pelo ajuste linear empregando o método dos mínimos quadrados ponderado</i> | 61 |
| 4.2 Resultados Obtidos para o Segundo Conjunto de Dados Levantados (Outubro de 2007) .. | 65 |
| 4.2.1 <i>Curvas de calibração obtidas para o protótipo pelo método dos mínimos quadrados ponderado</i> | 65 |
| 4.2.1.1 <i>Cálculo de parâmetros e incertezas do modelo</i> | 65 |
| 4.2.1.2 <i>Análise de consistência do modelo</i> | 68 |
| 4.2.2 <i>Cálculo da incerteza de medição manovacuômetro do desenvolvido</i> | 68 |
| 4.2.2.1 <i>Avaliação da incerteza utilizando-se a expressão fornecida no datasheet do sensor</i> | 69 |
| 4.2.2.2 <i>Avaliação da incerteza utilizando-se a expressão obtida durante a calibração pelo ajuste linear empregando o método dos mínimos quadrados ponderado</i> | 72 |
| 4.3 <i>Avaliação do Modelo Baseado em WLS, Construído com o Conjunto de Dados de Abril/2007 em Contrapartida com os Pontos de Calibração Levantados em Outubro/2007</i> | 74 |
| CAPÍTULO V – DISCUSSÃO | 77 |
| CAPÍTULO VI – CONCLUSÃO | 81 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 83 |
| ANEXO A – FREESCALE (2004) | 89 |
| ANEXO B – Tabela de conversão de unidades – Modificado de INMETRO (2008) | 99 |
| ANEXO C – FERREIRA <i>et al.</i> (2008) | 100 |
| ANEXO D – FERREIRA <i>et al.</i> (2007) | 104 |

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

De acordo com o Vocabulário Internacional de Termos Gerais e Fundamentais de Metrologia – VIM (INMETRO, 2005, p. 22), *metrologia* é a ciência da medição e “abrange todos os aspectos teóricos e práticos relativos às medições, qualquer que seja a incerteza, em quaisquer campos da ciência e tecnologia”.

O VIM apresenta a definição de *medição* como sendo o conjunto de operações que tem por objetivo determinar um valor de uma grandeza, esta, por sua vez, definida como atributo de um fenômeno, corpo ou substância que pode ser qualitativamente distinguido e quantitativamente determinado. Para LIRA (2002), a medição é uma característica inerente aos diversos processos existentes. Ela é indispensável para a manutenção das inúmeras funções da tecnologia na sociedade moderna e são realizadas a toda hora e em todos os lugares, desde complicados experimentos necessários para o desenvolvimento e comprovação das mais novas teorias científicas até usos rotineiros na indústria, no comércio e nas residências.

A maioria das pessoas desconhece o fato de que as informações geradas em uma medição raramente podem ser julgadas como completas. Em verdade, os resultados ali obtidos geralmente refletem apenas uma *estimativa* da grandeza medida, e o “valor verdadeiro” da grandeza permanece desconhecido. Por causa disso, a dispersão dos valores em torno do valor estimado poderia, igualmente, ser atribuída ao mensurando, ou seja, o objeto da medição ou grandeza específica submetida à medição (INMETRO, 2005). Tal dispersão, pela metrologia, é chamada de *incerteza da medição* e reflete a falta de conhecimento exato do valor da grandeza medida (ABNT e INMETRO, 2003).

A metrologia vem, portanto, ao encontro da necessidade de se estudar e se avaliar o processo da medição, determinando-se critérios e diretrizes para que a ação de medir uma grandeza possa estabelecer-se de forma confiável e que os valores encontrados representem, da forma mais fidedigna possível, o valor mais provável do mensurando. Esse aspecto é uma exigência fundamental das diversas operações que se processam em um mundo de economia

globalizada, regida por rigorosos sistemas de avaliação, padronização e qualidade, que objetivam garantir a confiabilidade necessária no controle da qualidade de produtos e serviços (MATHIOULAKIS e BELESSIOTIS, 2000). “Uma base científica forte e confiável e um sistema de medição harmonizado são indispensáveis para prover a eficiência na produção e no comércio de bens e serviços que atendam às necessidades da sociedade” (CORRÊA, 2001, p. 1).

Em virtualmente todas as nações industrializadas do mundo, há um NMI – instituto nacional de metrologia (do inglês, *national metrology institute*) que é o órgão executor local das políticas de metrologia. No Brasil, esse papel é delegado, pelo governo federal, ao INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial). O INMETRO é responsável também pelo estabelecimento de critérios e normalização geral referente à expressão da incerteza da medição (INMETRO, 2007). Dentre suas funções, ainda, o INMETRO planeja e gerencia o sistema brasileiro de credenciamento de laboratórios de calibração e de ensaios, e de organismos de certificação (produtos, sistemas de qualidade e pessoal) e inspeção.

O INMETRO constitui a secretaria executiva do CONMETRO, Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial que é um colegiado interministerial e exerce a função de órgão normativo do SINMETRO, Sistema Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. Este último, por sua vez, é constituído por entidades públicas e privadas, e exerce atividades relacionadas à metrologia, normalização, qualidade industrial e certificação de conformidade. O INMETRO e o CONMETRO, juntamente com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Institutos Estaduais de Pesos e Medidas (IPEMs) e todos os outros organismos de normalização, laboratórios de metrologia científica e industrial, e os institutos de metrologia legal dos estados, ajudam a compor e/ou apóiam o SINMETRO (INMETRO, 2007). Esta estrutura está formada para atender as necessidades da indústria, do comércio, do governo e do consumidor. O SINMETRO, o CONMETRO e o INMETRO foram criados em 11 de dezembro de 1973, cabendo a este último substituir o então Instituto Nacional de Pesos e Medidas (INPM).

No começo da década de 90 do século passado, preocupações crescentes do governo brasileiro, juntamente com produtores e usuários, com a qualidade dos produtos consumidos e serviços prestados, acarretaram o estabelecimento de diretrizes e a adoção de algumas ações que viessem de encontro àquela preocupação.

Isso se refletiu na área de saúde, e, considerando a necessidade de se instituir no país uma política de controle de qualidade para a produção e comercialização dos equipamentos médico-hospitalares (EMH), o Ministério da Saúde (MS), que é um dos órgãos colegiados do CONMETRO, por meio da Portaria 2043, de 12/12/2004, tornou compulsória a certificação para tal tipo de equipamento (BRASIL, 1994).

Certificação pode ser definida como ato em que um terceiro, isto é, organização independente credenciada, demonstra existir garantia adequada de que um produto, processo ou serviço devidamente identificado está em conformidade com uma norma ou regulamento técnico. É uma modalidade de *Avaliação da Conformidade* que, por sua vez, é definida como sendo um processo sistematizado, com regras pré-definidas, devidamente acompanhado e avaliado, de forma a propiciar adequado grau de confiança de que um produto, processo ou serviço, ou ainda um profissional, atende a requisitos pré-estabelecidos em normas ou regulamentos (INMETRO, 2007).

A regulamentação do processo de certificação de qualidade de EMH no Brasil é, hoje, definida por dois documentos normativos: a Resolução RDC nº 32 da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), publicada em junho de 2007 (BRASIL, 2007) e o Regulamento de Avaliação da Conformidade para Equipamentos Eletromédicos, anexo da portaria nº 86 do INMETRO, de abril de 2006 (BRASIL, 2006). O primeiro define os contornos políticos da certificação, enquanto o segundo descreve os detalhes técnicos que condicionam este processo.

Paralelamente aos esforços governamentais (ANVISA, 2004a, 2004b; BRASIL, 2002), existem processos de certificação como os da série ISO 9000 (ICHINOSE, 2004) e ISO 17025 que podem ser aplicados às instituições de saúde, e que exigem calibrações periódicas dos EMH. Apesar de não ser compulsório, esse tipo de certificação fornece alguns requisitos que a instituição deve cumprir para que determinados padrões de qualidade possam ser atingidos. Dessa forma, possibilita que produtos, processos e serviços adquiram maior garantia de qualidade e aceitação no mercado.

Mas, para CORRÊA (2001), a confiabilidade metrológica no setor de saúde no Brasil ainda é incipiente. Questões básicas relacionadas, por exemplo, ao controle de instrumentos médico-hospitalares ou a padrões metrológicos de qualidade permanecem em aberto. Haja vista a pequena quantidade de EMH certificados em contrapartida à surpreendente diversidade de

modelos e quantidade de instrumentos/equipamentos em uso no setor, via de regra dependentes de calibração sofisticada que demandam complexa infra-estrutura laboratorial, métodos e práticas de calibração não-disponíveis nos laboratórios credenciados que integram as redes laboratoriais implementadas no país para esse fim.

Uma das principais aplicações do EMH, o apoio ao diagnóstico médico, é, cada vez mais, realizado com base no resultado de medições. “Elas descrevem pressão arterial, atividade elétrica do coração, concentração de colesterol ou níveis de muitos outros componentes essenciais do sangue. A importância dessas medições é óbvia, tanto quanto a necessidade de confiabilidade para elas” (LIRA, 2002, p. 13). Por conseguinte, a não-calibração de um equipamento eletromédico pode, conduzir a erro no diagnóstico clínico e terapias equivocadas que poderão levar à ocorrência de uma iatrogenia no paciente. Da mesma forma, a incerteza de medição associada a tal tipo equipamento pode levar o médico à condução de um erro no diagnóstico (PARVIS e VALLAN, 2002).

Diante desse cenário, o NEPEB, Núcleo de Estudos e Pesquisa em Engenharia Biomédica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, decidiu fazer um estudo metrológico de um equipamento médico-hospitalar desenvolvido por este laboratório. Trata-se de um *medidor digital de pressões respiratórias máximas* ou *manovacuômetro digital*. A motivação para esse empreendimento foi realizar uma avaliação do equipamento com base em diretrizes, procedimentos e normas metrológicas vigentes, de organismos nacionais e internacionais, e confrontar os resultados obtidos com a discussão pertinente na literatura da área de metrologia.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem por objetivos propor modelos por meio dos quais possam ser avaliadas algumas características metrológicas, a saber, *a calibração e o cálculo da incerteza da medição*, de um equipamento médico-hospitalar desenvolvido pelo NEPEB, o medidor digital de pressões respiratórias máximas. Espera-se, com isso, realizar uma avaliação prévia da qualidade dos resultados de medição obtidos pelo uso do medidor, referentemente às práticas metrológicas adotadas tanto por organismos nacionais como internacionais, estabelecendo-se, com efeito, parâmetros para analisar sua confiabilidade. Essa avaliação será muito importante para auxiliar o NEPEB na definição das condutas a serem adotadas pelo laboratório com

relação ao manovacuômetro digital, e mesmo a outros equipamentos eletromédicos desenvolvidos no laboratório, a fim de que eles possam estar em acordo com os padrões exigidos pela normalização metrológica vigente. Portanto, possam ser submetidos e aprovados em processos de certificação e, assim, estejam aptos a serem utilizados em laboratórios de pesquisa, em nível clínico e comercial.

O estudo envolveu, portanto, a avaliação de duas características metrológicas consideradas fundamentais para a garantia da confiabilidade de medição do manovacuômetro, implementada por meio do levantamento de sua curva de calibração.

1.2 Estrutura do Trabalho

Uma revisão dos conceitos metrológicos importantes para o desenvolvimento do trabalho é apresentada no Capítulo II. Nesse sentido, um breve histórico relacionado a alguns temas metrológicos, bem como determinados conceitos como metrologia, medição, calibração, rastreabilidade, precisão, exatidão, incerteza de medição, erro, densidade de probabilidade, probabilidade de abrangência e intervalo de cobertura, são discutidos ou detalhados.

No Capítulo III, Materiais e Métodos, inicialmente, são exibidas algumas características do medidor digital de pressões respiratórias desenvolvido pelo NEPEB, para o qual foi realizada a análise metrológica proposta neste trabalho. Em seguida, apresenta-se a metodologia utilizada para obtenção dos resultados julgados importantes para implementação do estudo. Tais resultados, por sua vez, estão expostos no Capítulo IV.

A discussão dos resultados obtidos é realizada no Capítulo V e, finalmente, as conclusões do trabalho são feitas no Capítulo VI, no qual expõem-se, também, propostas para trabalhos futuros.

CAPÍTULO II

METROLOGIA, CALIBRAÇÃO E INCERTEZA DA MEDIÇÃO

Para que fosse implementado o estudo metrológico do manovacuômetro digital, fez-se necessário o levantamento do estado da arte e a discussão de vários conceitos que constituem o embasamento técnico-científico para a construção da modelagem metrológica a ser proposta. Nesse sentido, o significado de termos como metrologia, calibração e incerteza de medição, e de vários outros que vão se mostrando relevantes durante o processo de pesquisa, foram investigados e ampliados à luz da literatura disponível sobre o assunto. A seguir, são apresentados os conceitos julgados mais pertinentes para o desenvolvimento deste trabalho.

2.1 Metrologia e Medição

O conceito de *metrologia* tem estreita relação com o conceito de medição. Este, por sua vez, tem raízes profundas na cultura humana desde a origem da civilização. “Medições tem sido sempre a ponte entre o mundo dos fenômenos empíricos e o mundo dos conceitos abstratos e do conhecimento. Por esta razão, a atividade de medição é a base do conhecimento obtido por meio de resultados experimentais” (FERRERO e SALICONE, 2006, p. 44). Segundo esses autores, na Idade Moderna, o matemático, físico, filósofo e astrônomo italiano Galileu Galilei colocou, como a base da ciência, a experimentação, mostrando que esta é o único ponto de partida possível para a validação de alguma teoria científica. Mais de um século depois, o matemático e físico britânico William Thomson, ou Lord Kelvin, reforçou o conceito de Galilei. Em um trecho retirado de uma leitura para a Instituição de Engenheiros Civis no Reino Unido, em 3 de maio de 1883, Lord Kelvin afirma:

eu sempre digo que quando se pode medir o que se está discorrendo, e pode-se expressá-lo por meio de números, conhece-se algo a seu respeito; mas quando não se pode expressá-lo por meio de números, o conhecimento sobre ele é insuficiente e insatisfatório. [...] Assim, portanto, se ciência é medição, então sem metrologia não

pode haver ciência (FERRERO, 2007, p. 2; FERRERO e SALICONE, 2006, p. 44; WEBSTER, 1999, p. 4).

Segundo LIRA (2002, p. 3), a origem da metrologia remonta aos mais antigos comerciantes que possuíam como instrumentos de troca moedas de ouro e balanças de travessão:

Em alguns aspectos, pequenas foram as mudanças daqueles tempos para os dias atuais, exceto que as moedas de hoje raramente são de ouro. Outrora, como agora, vendedores e compradores deveriam concordar com as unidades de troca. Mas, diferentemente dos tempos antigos, nos quais a flutuação entre taxas de câmbio e de valores das unidades de medida ocorria totalmente sem nenhum critério ou padronização, hoje há concordância a respeito de um sistema estável de unidades de medida que é reconhecido em todo o mundo.

Este sistema estabeleceu-se a partir da Convenção do Metro no ano de 1875. Ele é mantido, desde então, pelo *Bureau International des Poids et Mesures* (BIPM) e pelos laboratórios nacionais de metrologia (LIRA, 2002).

LIRA continua, afirmando que a necessidade de uma convenção internacional foi, inicialmente, reconhecida na década de 60 do século XIX como sendo um requisito essencial para o crescimento do comércio internacional de produtos industriais e manufaturados. O sistema métrico decimal francês, na metade do século seguinte à sua criação, era utilizado não somente na França, mas em vários países da Europa. O sistema métrico foi escolhido, assim, como base do sistema internacional de unidades criado pela Convenção, resultado de um tratado intergovernamental entre, inicialmente, 17 nações participantes compreendidas substancialmente entre as mais industrializadas do mundo. A Convenção estabeleceu uma estrutura organizacional permanente por meio da qual os governos podem atuar em comum acordo com relação aos diversos problemas referentes às unidades de medida. Ela também criou o BIPM que, hoje, atua como importante centro mundial de metrologia.

Após a fundação do BIPM, algumas das nações mais industrializadas criaram seus próprios laboratórios nacionais de metrologia (ou NMIs). Em seguida, outros foram sendo criados, expandindo-se pelas outras nações industrializadas. Como exemplo de alguns NMIs presentes, hoje, em alguns países, podem ser citados o *Physikalisch-Technische Bundesanstalt* (PTB), na Alemanha, o *National Institute of Standards and Technology* (NIST), nos Estados Unidos, o *Instituto Nacional de Tecnología Industrial* (INTI), na Argentina, e o INMETRO, no Brasil.

Com o tempo, o sistema métrico foi ampliado para incluir unidades fotométricas e elétricas. Em 1960, ganhou uma roupagem moderna, o Sistema Internacional de Unidades (SI), adotado durante a décima edição da *Conférence Générale des Poids et Mesures* (CGPM), estabelecida pela Convenção, que, hoje, ocorre a cada quatro anos em Paris. O SI possui sete unidades de base, mostradas na Tabela 2.1 (INMETRO, 2005), e inclui também unidades derivadas juntamente com prefixos para os múltiplos e submúltiplos das unidades de base. Hoje é o sistema de unidades quase universalmente usado nos campos da ciência e tecnologia (LIRA, 2002).

Tabela 2.1: As sete unidades de base do Sistema Internacional de Unidades (INMETRO, 2005).

| Grandeza | Unidade SI | |
|----------------------------------|------------|---------|
| | Nome | Símbolo |
| Comprimento | metro | m |
| Massa | quilograma | kg |
| Tempo | segundo | s |
| Corrente Elétrica | ampère | A |
| Temperatura Termodinâmica | kelvin | K |
| Quantidade de Matéria | mol | mol |
| Intensidade Luminosa | candela | cd |

LIRA (2002) aponta que aplicações práticas do SI, para a maioria dos usuários de equipamentos de medição, que não tem meios diretos para conversão das unidades do SI, são executadas por meio de sistemas nacionais de medição baseados em unidades mantidas ou convertidas em um NMI. Desde os seus primórdios, os NMIs têm dentre outros objetivos, o de estabelecer os padrões nacionais de medição e asseguram comparabilidade com os padrões nacionais de outros países. Portanto, os NMIs são responsáveis por assegurar a manutenção dos padrões primários, que são rastreáveis (conceito que é apresentado mais adiante) aos padrões mantidos pelo BIPM. Baseado nestes padrões primários, por exemplo, o INMETRO, no Brasil, “estabelece uma cadeia de rastreabilidade que assegura aos laboratórios secundários a ele referenciados a consistência às referências internacionais” (FERNANDES *et al.*, 2007, p. 1).

Os NMIs têm se preocupado, recentemente, em estabelecer padrões que são reproduzidos por meio de constantes fundamentais da física (FERNANDES *et al.*, 2007). A manutenção de padrões baseados em artefatos materiais apresenta alguns problemas quando comparada à

tendência atual de se referenciar os padrões mantidos àquelas constantes. Por exemplo, o *quilograma*, é mantido pelo BIPM há mais de cem anos:

o quilograma é a última unidade do sistema SI ainda definida por um artefato material, o protótipo internacional do quilograma [...]. Porém, um artefato padrão para a massa tem um número de desvantagens. Ela não pode ser reproduzida em qualquer lugar, ela pode ser danificada ou mesmo destruída e acumula contaminação, devendo ser limpa por meio de efeitos conhecidos incompletamente (STOCK, M., 2007, p. 1).

Da mesma forma, no tocante ao padrão de resistência, “os resistores padrão utilizados estão sujeitos a variações temporais em função de propriedades intrínsecas dos materiais, bem como sofrer com as condições ambientais (pressão e temperatura)” (FERNANDES *et al.*, 2007, p. 1). Com o propósito de contornar essa situação e obter maior estabilidade, padrões baseados em física quântica têm sido preconizados pelos NMIs a fim de se relacionar o valor do padrão requerido às constantes físicas fundamentais, como, por exemplo, à constante de Planck, no caso da unidade derivada *ohm*. Fenômenos físicos como o efeito Hall quântico e o efeito de Josephson são utilizados nos experimentos que proporcionam a determinação dos valores dos padrões (FERNANDES *et al.*, 2007; STOCK, 2007).

Nem sempre o conceito de metrologia esteve associado ao de “ciência da medição”, conforme observado por KIND e LÜBBIG (2003), sendo que essa é uma acepção introduzida recentemente pela na literatura do gênero. Este significado distanciou-se do que, por exemplo, era encontrado em relatos do século XVIII em que o termo era usado como sinônimo para “pesos e medidas”.

A etimologia da palavra medição possui raiz grega, *μετρον*, que significa *métron* ou *medida* (KIND e LÜBBIG, 2003). Um conceito de medição de uma grandeza física sugerido por FERRERO e SALICONE (2006) estabelece que medir é comparar a mesma quantidade com outra, que é homogênea com a primeira, e é considerada a unidade de medida. Na realização dessa comparação quantitativa, cinco agentes são requisitados, conforme é mostrado na Figura 2.1, de acordo com a representação apresentada por FERRERO e SALICONE:

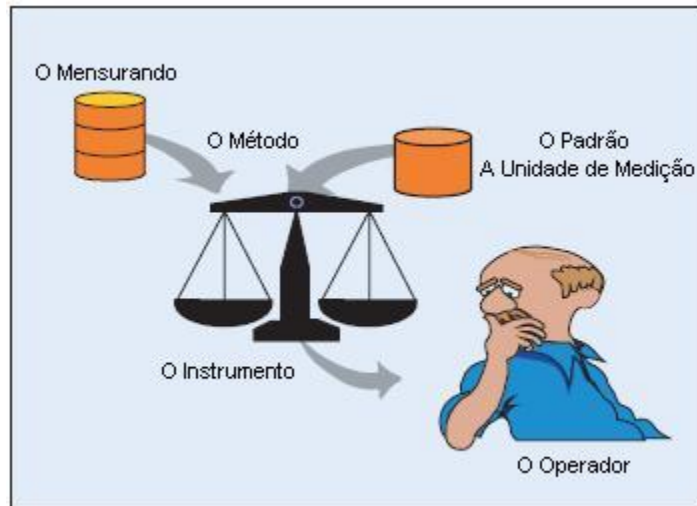


Figura 2.1: Representação do processo de medição juntamente com os cinco agentes que o compõem – modificado de FERRERO E SALICONE (2006).

- O mensurando: a grandeza submetida à medição, que muitas vezes representa uma propriedade do objeto físico, e é descrita por um modelo matemático apropriado.
- O padrão: a representação física da unidade de medida.
- O instrumento: o equipamento físico que realiza a comparação.
- O método: o processo de comparação, entre o mensurando e o padrão; é implementado fazendo-se o uso de um fenômeno físico (dilatação térmica, força mecânica entre cargas elétricas, efeito Doppler, etc.).*
- O operador: a pessoa que supervisiona o processo por inteiro, opera os equipamentos de medição e lê o instrumento.

FERRERO E SALICONE (2006), emendam, ainda, afirmando que esse modelo é um esquema conceitual e os cinco elementos podem ser agrupados e rearranjados de forma variada. Por exemplo, afirmam os autores, “instrumentos modernos podem possuir internamente um padrão local e processar uma quantidade grande de dados brutos, acarretando menores níveis de processamento computacional e menores intervenções no processo por parte do operador” (FERRERO E SALICONE, 2006, p. 45). Hoje em dia, há instrumentos e processos de medição que são dedicados a medir grandezas não-físicas (por

* O VIM atribui à base científica da medição o nome de *princípio de medição*. Com relação ao método de medição propriamente dito, a definição atribuída é “seqüência lógica de operações, descritas genericamente, usadas na execução das medições” (INMETRO, 2005, p. 23).

exemplo, nível de satisfação do cliente) como também existem instrumentos que não constituem equipamentos físicos (instrumentação virtual), de acordo com FERRERO e SALICONE (2006); KORCZYNSKY e HETMAN (2005); NUCCIO e SPATARO (2001), o que, certamente, altera ou desloca a quantidade de esforço despendida por cada um dos agentes, durante o processo de medição.

Por meio de um processo perfeito de medição, seria obtido o valor verdadeiro de uma grandeza (INMETRO, 2005). Entretanto, esse valor verdadeiro é sempre indeterminado. Ele pode apenas ser estimado por meio da medição em virtude dos seguintes fatores associados aos agentes do processo (FERRERO e SALICONE, 2006):

- a) da forma como o mensurando é concebido, deve ser levado em conta que tanto o seu conhecimento exato como o do modelo matemático que o descreve são sempre incompletos. Conforme mencionado no “Guia para Expressão da Incerteza de Medição” – GUM (ABNT e INMETRO, 2003, p. 42), “em princípio, um mensurando não pode ser completamente descrito sem um número infinito de informações”;
- b) no caso do padrão, não há aí uma realização exata da unidade de medição, mas uma suposta boa aproximação, sendo que ele, muitas vezes, representa a unidade;
- c) quanto ao instrumento, seu comportamento é geralmente diferente do ideal. Os motivos que acarretam a mudança de comportamento dependem, naturalmente, dos diferentes tipos de tecnologias empregadas na sua construção. Outras razões podem ser atribuídas à existência de componentes não-ideais, à presença de ruídos gerados internamente, à influência de condições ambientais (temperatura, umidade, interferência eletromagnética, etc.), à eventual não-calibração, ao tempo de uso, entre outras;
- d) de modo similar, o método de medição é usualmente baseado no emprego de um determinado fenômeno físico, enquanto outros tipos de fenômeno podem interferir consideravelmente no primeiro e, assim, interferir no resultado da medição de tal forma que o “valor verdadeiro” nunca poderá ser obtido;
- e) finalmente, o operador pode contribuir para que o “valor esperado” não seja obtido devido a diversas razões, tais como treinamento inadequado, leitura errônea da indicação no instrumento e incorreto pós-processamento das leituras.

Os efeitos do comportamento não-ideal dos cinco elementos do processo de medição podem ser verificados facilmente se o mesmo procedimento de medição* é repetido algumas vezes. Diferentes valores são sempre obtidos se as condições de medição não são alteradas.

A consequência mais importante das considerações acima é que um simples número, junto com uma unidade de medida, não pode expressar o resultado de uma medição uma vez que medições repetidas de uma grandeza, na verdade, caracterizam uma dispersão. Desde que o objetivo final da atividade de medição é sempre uma comparação, tal fato representa uma inaceitável limitação prática do processo. A introdução de ferramentas matemáticas e estatísticas para uma avaliação mais adequada do resultado da medição apresenta-se como uma solução para o caso, conforme ponderam FERRERO e SALICONE (2006, p. 46):

A chave para solução desse problema foi o reconhecimento que o resultado de uma medição provê apenas um conhecimento limitado e incompleto do mensurando e a introdução, nesse contexto, de ferramentas matemáticas apropriadas que permitissem lidar com a informação incompleta.

2.2 Calibração e Rastreabilidade

De acordo com o VIM, tem-se a seguinte definição para calibração:

conjunto de operações que estabelece, sob condições especificadas, a relação entre os valores indicados por um instrumento de medição ou sistema de medição ou valores representados por uma medida materializada ou um material de referência, e os valores correspondentes das grandezas estabelecidos por padrões (INMETRO, 2005, p. 58).

Ainda, segundo o VIM, o resultado de uma calibração permite tanto o estabelecimento dos valores do mensurando para as indicações como a determinação das correções a serem aplicadas. Portanto, a calibração envolve tanto o estabelecimento da referida relação quanto o cálculo da incerteza da medição. É o que afirmam MATHIOULAKIS e BELESSIOTIS (2000), que a calibração e testes em laboratório são usualmente obrigados a fornecer uma

* O VIM (INMETRO, 2005, p. 23) define procedimento de medição como “conjunto de operações, descritas especificamente, usadas na execução de medições particulares de acordo com um dado método”. Ao grau de concordância entre os resultados de medições sucessivas de um mesmo mensurando, sob as mesmas condições de medição o nome atribuído é o de *repetitividade*. “Condições de repetitividade incluem: mesmo procedimento de medição; mesmo observador; mesmo instrumento de medição, utilizado nas mesmas condições; mesmo local; repetição em curto período de tempo” (INMETRO, 2005, p. 28).

declaração da incerteza que diz respeito a uma faixa de valores e não só a um simples resultado. “Calibração é provavelmente o mais importante conceito no campo da metrologia uma vez que ela habilita que seja caracterizado quantitativa e qualitativamente o resultado de uma medição” (MATHIOULAKIS e BELESSIOTIS, 2000, p. 771).

De acordo com FERRERO e SALICONE (2006), basicamente, dois modos distintos podem ser seguidos para se estabelecer a calibração de um equipamento. O mais imediato é tomar um padrão referente à grandeza física e compará-lo com os resultados obtidos por meio da medição realizada pelo instrumento. Por meio desse modo, pode-se chegar a resultados mais precisos para a calibração. No entanto, é geralmente muito caro e sujeito a longas “listas de espera” por causa da alta demanda de equipamentos que necessitam serem calibrados e do pouquíssimo número disponível de padrões. Além disso, não existem padrões disponíveis para todo tipo de grandezas de medição. Um método alternativo para se implementar a calibração é a comparação do resultado da medição com outro resultado proveniente de um instrumento calibrado. No caso, a incerteza deste último pode ser rastreável até o padrão por meio de uma cadeia ininterrupta de comparações a instrumentos calibrados, todos tendo sua incerteza definida. Essa propriedade é definida pelo VIM como sendo a *rastreabilidade* do resultado de uma medição ou do valor de um padrão. Pelo fato de haver uma comparação de forma indireta, a incerteza de medição estabelecida por meio do segundo método é sempre maior do que aquela estimada pelo outro modo. Para MATHIOULAKIS e BELESSIOTIS (2000), rastreabilidade e incerteza de medição são os conceitos básicos relacionados à calibração.

Segundo esses autores, ainda, na prática, muitos instrumentos de medição são calibrados em uma faixa de valores e o resultado da calibração é muitas vezes expresso como uma correção ou um fator de calibração, ou com uma curva de calibração. Por exemplo, os métodos dos mínimos quadrados e dos mínimos quadrados ponderado possibilitam a obtenção da curva de calibração do equipamento (FULLER, 1987). A seguir, é apresentado o método dos mínimos quadrados ponderado, utilizado, neste trabalho, para calibração do manovacuômetro digital.

2.2.1 Calibração pelo método dos mínimos quadrados ponderado (WLS)

Conforme discutido na seção anterior, a calibração utilizando o ajuste pelos mínimos quadrados ponderado ou WLS (ABNT e INMETRO, 2003; FULLER, 1987; LIRA, 2002;

MATHIOULAKIS e BELESSIOTIS, 2000; PRESS *et al.*, 1992) é um dos métodos que podem ser empregados quando se deseja levantar a curva de calibração do equipamento.

De acordo com MATHIOULAKIS e BELESSIOTIS (2000), o equipamento de medição é calibrado pela comparação das J leituras X_j na saída do medidor com os valores de referência aplicados Y_j em sua entrada. “O problema matemático geral da calibração é encontrar um modelo de correção com N parâmetros a_n que represente uma série de J pontos de calibração (Y_j, X_j) com a maior exatidão possível” (MATHIOULAKIS e BELESSIOTIS, 2000, p. 773):

$$y(X) = y(X; a_1 \dots a_N). \quad (2.1)$$

Por meio de (2.1), o valor estimado y pode ser modelado como uma função da leitura X . Para determinação dos coeficientes $a_1 \dots a_N$ do modelo de correção é escolhida ou criada uma *função figura-de-mérito* que indica a concordância entre os dados de leitura e o modelo. O ajuste, então, é realizado de forma que essa função seja minimizada. Daí, obtêm-se os parâmetros que proporcionam o melhor ajuste (MATHIOULAKIS e BELESSIOTIS, 2000; PRESS *et al.*, 1992).

Intuitivamente, o ‘melhor’ ajuste deve ser aquele por meio do qual os desvios entre os a curva modelada e os dados sejam os menores possíveis. Por exemplo, poderiam ser investigados os parâmetros para a curva, dado que fossem minimizados os valores absolutos de tais desvios. Para o caso do método clássico dos mínimos quadrados (LS), criado por Gauss, a estimativa de máxima verossimilhança dos parâmetros é obtida pela minimização da função (LIRA, 2002):

$$\sum_{j=1}^J [Y_j - y(X_j; a_1, a_2, \dots, a_N)]^2, \quad (2.2)$$

em que o desvio padrão u referente às incertezas de medição dos pontos de calibração é independente, normalmente distribuído e constante para todos os pontos. MATHIOULAKIS e BELESSIOTIS (2000) argumentam que o problema com a aproximação acima é que, na realidade, o desvio padrão (ou incerteza de medição) típico é quase nunca constante ou o mesmo para todos os pontos, mas cada ponto de calibração (Y_j, X_j) tem seu próprio desvio padrão – incerteza u_j .

A alternativa, sugerida por tais autores, que contempla as incertezas dos dados experimentais e que é adotada nesse trabalho é, então, o método dos mínimos quadrados ponderado (WLS).

No caso deste método, a estimativa de máxima verossimilhança é obtida pela minimização da função qui-quadrada:

$$\chi^2 = \sum_{j=1}^J \frac{[Y_j - y(X_j; a_1, a_2, \dots, a_N)]^2}{u_j^2}, \quad (2.3)$$

onde u_j^2 é a variância da diferença $Y_j - y(X_j; a_1, a_2, \dots, a_N)$:

$$u_j^2 = \text{Var}[Y_j - y(X_j; a_1, a_2, \dots, a_N)]. \quad (2.4)$$

Portanto, no método WLS, as incertezas reais dos pontos de calibração são levadas em conta na determinação dos parâmetros, que é a condição da situação em estudo.

Da equação (2.4), segue que a grandeza u_j^2 depende das incertezas experimentais dos valores de referência aplicados ao medidor e os valores lidos em sua saída, respectivamente $u_{y,j}^2$ e $u_{x,j}^2$. Com essa consideração em mente, a função qui-quadrada realmente dá uma idéia sobre a relação do desvio entre a estimativa do modelo dos dados experimentais e as incertezas de medição (MATHIOULAKIS e BELESSIOTIS, 2000).

Para o caso em estudo em que é aplicada uma regressão linear aos dados experimentais, o modelo proposto para o ajuste é do tipo bi-paramétrico:

$$y(X) = aX + b, \quad (2.5)$$

onde a é a inclinação da curva e b é o seu intercepto. Então, a função qui-quadrada χ^2 para o caso linear torna-se:

$$\chi^2(a, b) = \sum_{j=1}^J \frac{(Y_j - b - aX_j)^2}{u_{y,j}^2 + a^2 u_{x,j}^2}. \quad (2.6)$$

De acordo com PRESS *et al.* (1992), a soma ponderada de variâncias no denominador da equação (2.6) pode ser entendida como a variância na direção do menor valor de χ^2 entre cada ponto de calibração e a reta com inclinação a , e também como a variância da combinação linear $Y_j - b - aX_j$ das duas variáveis aleatórias X_j e Y_j ,

$$\text{Var}(Y_j - b - aX_j) = \text{Var}(Y_j) + a^2 \text{Var}(X_j) = u_{y,j}^2 + a^2 u_{x,j}^2. \quad (2.7)$$

O objetivo é, então, minimizar a equação (2.6) com respeito a a e b . A minimização com relação ao intercepto $\partial\chi^2/\partial b = 0$ é linear. No entanto, dificuldades ocorrem para minimizar χ^2 em relação à inclinação pelo fato de a aparecer no denominador de (2.6), o que torna a equação para o intercepto $\partial\chi^2/\partial a = 0$ não-linear. A solução a ser utilizada é encontrar os parâmetros e suas incertezas numericamente. PRESS *et al.* (1992) sugerem a estratégia que é utilizada neste trabalho: escalar os y_j de forma a ter variâncias iguais para os x_j , implementando-se, então, um ajuste linear convencional com os pesos derivados da soma (escalada) $u_{y,j}^2 + u_{x,j}^2$. Isso fornece uma boa aproximação inicial para a caso os dados sejam bem representados pelo modelo linear. Através de novas iterações de cálculo, estabelecidas dentro de condições limite determinadas, os valores dos parâmetros e suas incertezas podem ser, por fim, determinados.

A metodologia matemática empregada para o cálculo é apresentada a seguir. Conforme descrito por MATHIOULAKIS e BELESSIOTIS (2000), os parâmetros a e b e suas incertezas u_a e u_b podem ser obtidos de:

$$(K^T \cdot K) \cdot C = K^T \cdot L, \quad (2.8)$$

onde C é um vetor cujos elementos c_1 e c_2 são, respectivamente, os parâmetros b e a ; e $H = (K^T \cdot K)^{-1}$ é uma matriz cujos elementos da diagonal principal $h_{1,1}$ e $h_{2,2}$ correspondem às variâncias ou ao quadrado das incertezas u_b e u_a , respectivamente. Os elementos que se localizam fora da diagonal principal, $h_{1,2} = h_{2,1}$, são as covariâncias entres os parâmetros do modelo. K é a matriz com $J \times 2$ componentes:

$$K = \begin{bmatrix} k_{J,1} & k_{J,2} \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ k_{1,1} & k_{1,2} \end{bmatrix}, \quad (2.9)$$

onde $k_{j,1} = \frac{1}{w_j}$ e $k_{j,2} = \frac{X_j}{w_j}$.

L é o vetor:

$$L = \begin{bmatrix} Y_1 / w_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ Y_J / w_J \end{bmatrix}. \quad (2.10)$$

Deve-se observar, ainda, que os elementos de K e L são ponderados inversamente pelos pesos w_j , que correspondem, justamente, à soma ponderada de variâncias no denominador da equação (2.6). Por meio da solução de (2.8), portanto, obtêm-se os parâmetros da curva ajustada e suas respectivas incertezas.

2.3 Incerteza da Medição, Erro, Precisão e Exatidão

Segundo FERRERO e SALICONE (2006, p. 46):

a primeira tentativa “histórica” de quantificar a ausência de informação completa fornecida pelo resultado de medição foi a estimativa do erro de medição como a diferença entre o valor real medido e o valor verdadeiro do mensurando. Essa definição, entretanto, não condiz com a consciência que se tem nos dias de hoje (que pode ser rastreada ao princípio da incerteza de Heinsenberg) que o valor verdadeiro não é apenas desconhecido, mas nunca pode ser determinado.

Na década de 1980, o conceito de incerteza foi introduzido como “um atributo quantificável da medição que caracteriza a dispersão dos valores que razoavelmente podem ser atribuídos à medição” (FERRERO e SALICONE, 2006, p. 46).

A incerteza de medição é, assim, uma expressão do fato de que, para um dado mensurando e um dado resultado de sua medição, não há um único valor, mas, sim, um infinito número de valores, dispersos em torno do resultado, que são consistentes com todas as observações e dados e conhecimento sobre o mundo físico, e que podem ter diferentes graus de credibilidade atribuídos ao mensurando (ABNT e INMETRO, 2003, p. 44).

LIRA (2002, p. 35) ressalta que:

É muito importante distinguir claramente entre os conceitos de incerteza e erro [...]. Erro e incerteza são muitas vezes tomados como sinônimos na literatura técnica. De

fato, não é incomum encontrar incertezas ‘aleatórias’ e ‘sistemáticas’. O uso dessa terminologia é, nos dias de hoje, fortemente desencorajada.

No VIM, erro é definido como um resultado de uma medição menos o valor verdadeiro de mensurando. Conforme mencionado em ABNT e INMETRO (2003), em geral, uma medição tem imperfeições que dão origem a um erro no resultado da medição. Por tradição, um erro é visto como tendo dois componentes, um componente aleatório e um componente sistemático.

O componente aleatório se origina, presumivelmente, de variações temporais ou espaciais, estocásticas ou imprevisíveis, de grandezas de influência. Os efeitos de tais variações, doravante denominados efeitos aleatórios, são a causa de variações em observações repetidas do mensurando. De acordo com o GUM, embora não seja possível compensar esse componente de um resultado de medição, ele pode geralmente ser reduzido aumentando-se o número de observações; sua esperança ou valor esperado é igual a zero para um número infinito de observações (teorema dos grandes números – PAPOULIS e PILLAI, 2002).

“O componente sistemático, como o erro aleatório, não pode ser eliminado; porém, freqüentemente ele pode ser reduzido” (ABNT e INMETRO, 2003, p. 5). No caso de um componente sistemático se originar de um efeito reconhecido de uma grandeza de influência em um resultado de medição, doravante denominado efeito sistemático, o efeito pode ser quantificado e, se for significativo com relação à exatidão requerida pela medição, pode-se aplicar uma correção ou fator de correção para que o efeito seja compensado. Supõe-se que, após esta correção, a esperança ou valor esperado do erro provocado por um efeito sistemático seja zero.

De acordo com o discutido anteriormente, *erro* é um conceito idealizado e os erros não podem ser conhecidos exatamente. “É bastante óbvio que essa abordagem é irreparavelmente indeterminada pela impossibilidade teórica de se conhecer o valor verdadeiro do mensurando” (FERRERO, 2007, p. 3).

“É importante também definir os conceitos de *exatidão* e *precisão*” (LIRA, 2002, p. 38). O VIM define exatidão como sendo o “grau de concordância entre o resultado de uma medição e um valor verdadeiro do mensurando” (INMETRO, 2005, p. 27). Em outras palavras, uma medição é tão exata quanto menor for o erro associado. Segundo LIRA (2002), um “instrumento exato” é aquele que pequenas correções devem ser feitas à indicação do instrumento. De forma quantitativa, ao se atribuir um valor numérico à exatidão significa que

não se espera que o valor medido tenha desvio superior ao valor especificado. O conceito de precisão não é definido no VIM. Porém, no próprio VIM, é alertado que os termos *exatidão* e *precisão* não podem ser utilizados como sinônimos. Na literatura, a palavra precisão pode assumir diversos sentidos, mas, quando se refere à medição, o sentido usual é o de que ela expressa a variabilidade de uma série de resultados de medição com grande repetitividade. A distinção conceitual entre exatidão e precisão para um instrumento de medição está ilustrada graficamente na Figura 2.2, de acordo com CARVALHO (2004):

- 1) o instrumento apresenta baixa exatidão e baixa repetitividade;
- 2) o instrumento apresenta baixa exatidão e alta repetitividade, i.e., alta precisão;
- 3) o instrumento apresenta alta exatidão e alta repetitividade.

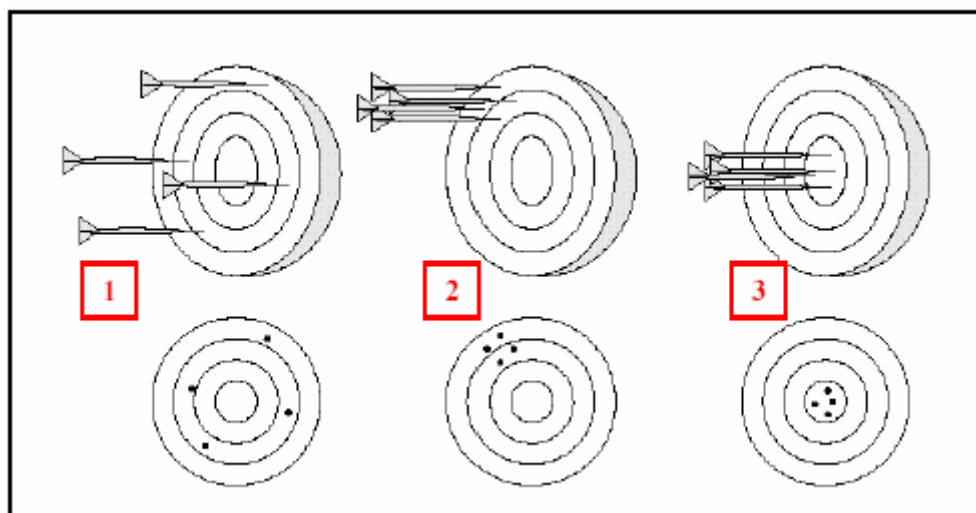


Figura 2.2: Exatidão e precisão (CARVALHO, 2004).

2.4 Expressão da Incerteza da Medição

Quando se conhece a incerteza de uma medição, pode-se ter acesso ao grau de confiança que pode ser atribuído ao resultado da medição. Não existe apenas uma maneira de se expressar quantitativamente a dúvida que o resultado da medição representa. Como consequência, procedimentos diferentes e, em alguns casos, conflitantes para avaliação da incerteza foram desenvolvidos ao longo dos anos (LIRA, 2002).

De acordo com o GUM (ABNT e INMETRO, 2003), a falta de consenso internacional sobre a expressão da incerteza em medição fez com que, em 1977, o *Comité International des Poids*

et Mesures (CIPM), a autoridade mundial máxima na área de metrologia, solicitasse ao seu corpo executivo, o BIPM, tratar o problema juntamente com outros NMIs. Um Grupo de Trabalho formado por especialistas de onze NMIs elaborou a Recomendação INC-1. A CIPM transferiu, então, a tarefa de elaborar um guia detalhado sobre a expressão da incerteza da medição, baseado na Recomendação do Grupo de Trabalho para a *Internacional Organization for Standardization* (ISO).

Em 1993, foi publicado o GUM, o “Guia para Expressão da Incerteza da Medição” (em inglês, *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*), fruto do trabalho de especialistas do BIPM, da *International Electrotechnical Commission* (IEC), da ISO e da *International Organization of Legal Metrology* (OIML). A publicação foi realizada pela ISO, em nome do BIPM, do IEC, da OIML, da *International Federation of Clinical Chemistry* (IFCC), da *International Union of Pure and Applied Chemistry* (IUPAC) e da *Union of Pure and Applied Physics* (IUPAP). Desde então, o GUM é o documento de referência em uso para avaliar e expressar a incerteza de medição, cujas prescrições podem ser seguidas em vários níveis, desde o chão da fábrica até o da pesquisa fundamental (ABNT e INMETRO, 2003).

Para FERRERO e SALICONE (2006, p. 47), o grande mérito do GUM foi:

prover uma definição operacional de incerteza e prescrições operacionais de como estimá-la. O embasamento matemático das definições e prescrições apontadas no GUM é a teoria das probabilidades, que é a mais efetiva teoria matemática para manuseio de informação incompleta.

Segundo FERRERO e SALICONE, ainda:

A principal suposição da teoria das probabilidades é que o resultado de uma medição já está corrigido para todos os efeitos sistemáticos reconhecidos. Seguindo essa idéia, os efeitos remanescentes que causam a “dispersão dos valores que razoavelmente poderiam ser atribuídos ao mensurando” são todos efeitos aleatórios. Com efeito, a dispersão pode ser representada por uma função densidade de probabilidade (pdf), que pode ser caracterizada pelos seus dois primeiros momentos: a média e o desvio padrão.

E citando o GUM: “A média é tomada como o resultado da medição x , e o desvio padrão, chamado ‘incerteza padrão’ $u(x)$, é usado como o ‘parâmetro [...] que caracteriza a dispersão dos valores que poderiam, razoavelmente, ser atribuídos ao mensurando’” (ABNT e INMETRO, 2003 *apud* FERRERO e SALICONE, 2006, p. 47).

De acordo com o GUM (ABNT e INMETRO, 2003, p. 5):

Na prática, existem muitas fontes possíveis de incerteza em uma medição, incluindo:

- a) definição incompleta do mensurando;
- b) realização imperfeita da definição do mensurando;
- c) amostragem não-representativa – a amostra medida pode não representar o mensurando definido;
- d) conhecimento inadequado dos efeitos das condições ambientais sobre a medição ou medição imperfeita das condições ambientais;
- e) erro de tendência pessoal na leitura de instrumentos analógicos;
- f) resolução finita do instrumento ou limiar de mobilidade;
- g) valores inexatos dos padrões de medição e materiais de referência;
- h) valores inexatos de constantes e de outros parâmetros obtidos de fontes externas e usados no algoritmo de redução de dados;
- i) aproximação e suposições incorporadas ao método e procedimento de medição;
- j) variações nas observações repetidas do mensurando sob condições aparentemente idênticas.

O GUM, ainda, pondera que tais fontes de incerteza não são necessariamente independentes e a fonte j) pode sofrer influência das fontes de a) a i). Efeitos sistemáticos não-reconhecidos não podem ser levados em consideração na avaliação do resultado da medição, mas, contribuem para o erro (ABNT e INMETRO, 2003).

2.4.1 Definições do GUM referentes à avaliação da incerteza da medição

Em acordo com a Recomendação INC-1 do Grupo de Trabalho sobre a Declaração de Incertezas, o GUM sugere que os componentes de incertezas sejam agrupados em duas categorias de avaliação, “A” e “B”, que não são substitutas dos termos “aleatório” e “sistemático”. Avaliações da incerteza do Tipo A podem caracterizar um efeito sistemático ou aleatório, dependendo do caso, o que também é válido para avaliações da incerteza do Tipo B.

A classificação Tipo A ou Tipo B não se propõe a indicar que haja qualquer diferença na natureza dos componentes. “Ambos os tipos de avaliação são baseados em distribuição de probabilidade e os componentes de incerteza resultantes de cada tipo são quantificados por variâncias ou desvios padrão” (ABNT e INMETRO, 2003).

2.4.1.1 Incerteza do Tipo A

FERRERO e SALICONE (2006) destacam que o GUM sugere que alguns componentes de incerteza devem ser calculados a partir de distribuições estatísticas do resultado de uma série de medições, caracterizadas por desvios padrão experimentais. Esse tipo de incerteza é obtido de uma avaliação do Tipo A. A variância u^2 é calculada a partir de uma série de observações repetidas e é a variância estatisticamente estimada s^2 . O desvio padrão estimado u , raiz quadrada positiva de u^2 ($u = s$) é, por conveniência, denominado *desvio padrão do Tipo A* (ABNT e INMETRO, 2003).

O GUM aponta que na maioria dos casos, a melhor estimativa disponível da esperança ou valor esperado μ_q de uma variável aleatória q , para a qual n observações independentes q_i foram obtidas sob as mesmas condições de medição, é a média aritmética ou média q_m das n observações:

$$q_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_i . \quad (2.11)$$

A variância experimental das observações, que estima a variância σ^2 da distribuição de probabilidade de q , é calculada por meio de:

$$s^2(q_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (q_i - q_m)^2 . \quad (2.12)$$

A estimativa da variância e sua raiz quadrada positiva $s(q_i)$, denominado desvio padrão experimental caracteriza a variabilidade dos valores q_i observados ou sua dispersão em torno da média q_m .

O GUM também destaca a melhor estimativa de $\sigma^2(q_m) = \sigma^2/n$, a variância da média, dada por:

$$s^2(q_m) = \frac{s^2(q_i)}{n} . \quad (2.13)$$

A variância experimental da média $s^2(q_m)$ e o desvio padrão experimental da média $s(q_m)$, igual à raiz quadrada positiva de $s^2(q_m)$, quantificam quão bem q_m estima a esperança μ_q de q , e qualquer um dentre eles pode ser usado como uma medida da incerteza de q_m [...]. Por conveniência, $u^2(q_i) = s^2(q_m)$ e $u(q_i) = s(q_m)$ são por vezes denominados uma *variância do Tipo A* e uma *incerteza padrão do Tipo A*, respectivamente (ABNT e INMETRO, 2003, p. 11).

2.4.1.2 Incerteza do Tipo B

Referindo-se ao GUM, novamente, FERRERO e SALICONE (2006) apontam que outros componentes de incerteza podem ser avaliados a partir de distribuições de probabilidade conhecidas previamente, onde a variância u^2 é calculada usando-se conhecimento disponível baseado em experiências anteriores ou outro tipo de informação. Este tipo de avaliação é aplicado quando o procedimento de medição não pode ser repetido ou quando o intervalo de cobertura associado à medição é conhecido *a priori*, i.e, por meio relatório de calibração. Nestes casos, então, em que a incerteza padrão u não pode ser calculada com base em análise estatística dos dados de uma série de observações, ela é denominada *incerteza padrão do Tipo B*.

O GUM coloca que:

para uma estimativa x_i de uma grandeza de entrada X_i que não tenha sido obtida através de observações repetidas, a variância estimada associada $u^2(x_i)$ ou a incerteza padrão $u(x_i)$ é avaliada por julgamento científico, baseando-se em todas as informações disponíveis sobre a possível variabilidade de X_i . O conjunto de informações pode incluir:

- a) dados de medições prévias;
- b) a experiência ou o conhecimento geral do comportamento e propriedades de materiais e instrumentos relevantes;
- c) especificações do fabricante;
- d) dados fornecidos em certificados de calibração e outros certificados;
- e) incertezas atribuídas a dados de referência extraídos de manuais.

Para maior conveniência, $u^2(x_i)$ e $u(x_i)$ estimados dessa maneira são, por vezes, referidos, respectivamente, como uma *variância do Tipo B* e uma *incerteza padrão do Tipo B* (ABNT e INMETRO, 2003, p. 12).

O GUM, ainda, pondera que uma avaliação do Tipo B da incerteza padrão exige discernimento baseado na experiência e no conhecimento geral, sendo que essa habilidade é apreendida com a prática. Quando a estimativa x_i for obtida de uma especificação do fabricante, do certificado de calibração, do manual técnico ou de outra fonte, e for declarado que sua incerteza citada é um determinado múltiplo de um desvio padrão, a incerteza padrão $u(x_i)$ é simplesmente o valor mencionado dividido pelo multiplicador, e a variância estimada $u^2(x_i)$ é o quadrado desse quociente.

2.4.1.3 Função densidade de probabilidade (pdf) e intervalo de cobertura

COX e HARRIS (2006) avaliam que, conforme apontado pelo GUM, de acordo com o conhecimento disponível, deve-se avaliar qual função de probabilidade pode ser atribuída para uma grandeza de entrada X_i com a finalidade de dar um indicativo de qual tipo de dispersão melhor a caracteriza. Esse procedimento é importante no processo de cálculo da incerteza da medição de uma grandeza, como é analisado a seguir. LIRA (2002) ressalta que há duas situações em que não se faz necessária a realização de tal atribuição: a primeira, quando da determinação da incerteza do Tipo A, aplica-se para grandezas que são medidas diretamente e é baseada na *teoria da amostragem* para estimativa do desvio padrão de uma distribuição de frequência de valores; a outra, quando da aplicação a *lei de propagação da incerteza*, objeto de discussão mais adiante neste trabalho.

PAPOULIS e PILLAI (2002) definem, matematicamente, função densidade de probabilidade, ou simplesmente pdf (do inglês, *probability density function*), como a função $f(q)$ definida no intervalo $(-\infty, \infty)$ tal que a probabilidade infinitesimal dp de uma variável aleatória estar dentro do intervalo q e $q + dq$ é $f(q)dq$. Segue, daí, que a probabilidade p da variável aleatória estar dentro dos limites q_1 e q_2 é igual a:

$$p = \int_{q_1}^{q_2} f(q) dq . \quad (2.14)$$

A forma normalizada da função densidade de probabilidade é dada pela integral:

$$1 = \int_{-\infty}^{\infty} f(q) dq. \quad (2.15)$$

Portanto, a área abaixo do gráfico da pdf corresponde à probabilidade de 100% da ocorrência dos valores da função. “A pdf associada a uma grandeza mensurável descreve não a realidade por si mesma, mas o conhecimento que se tem acerca da realidade. A pdf deve concordar e transmitir todo o tipo de informação pertinente à grandeza” (LIRA, 2002, p. 49). Tomando-se a integral da função densidade de probabilidade em relação ao intervalo em que ela está definida, encontra-se a função distribuição de probabilidade associada.

Dois tipos de pdfs aparecem com freqüência em aplicações metrológicas: são a função com distribuição normal (ou gaussiana) e a retangular (ou uniforme). O GUM chama atenção também para uma modalidade de distribuição, denominada triangular (ABNT e INMETRO, 2003). LIRA (2002) coloca em destaque, ainda, outros tipos de pdf, a trapezoidal e a logarítmica.

A função de densidade de probabilidade normal é definida pela expressão (PAPOULIS e PILLAI, 2002):

$$G(q) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{(q-\mu)^2}{\sigma^2}\right], \quad (2.16)$$

onde μ é o valor esperado e σ^2 corresponde à variância da variável aleatória q . Imediatamente, se uma grandeza é caracterizada como distribuída normalmente, sua esperança ou valor esperado corresponde à média q_m e σ à incerteza u_q . De outra forma, uma grandeza de entrada X_i terá, para esse tipo de distribuição, esperança x_i igual a μ e incerteza $u(x_i)$ igual a σ .

Conforme indicado por LIRA (2002, p. 56), “a pdf normal tem um *status* muito importante na teoria estatística. Na realidade, seu nome advém precisamente do fato de que ela se aproxima da distribuição de freqüência de valores que ocorrem ‘normalmente’ sob algumas circunstâncias comuns”. LIRA emenda, afirmando que uma das aplicações metrológicas mais importantes da pdf normal é a de que se uma grandeza é medida repetidamente, suas grandezas de influência que variam estocasticamente de leitura em leitura produzirão erros (aleatórios) individuais, cuja distribuição de freqüência pode, usualmente, ser modelada como a pdf normal (teorema do limite central – PAPOULIS e PILLAI, 2002).

Esses últimos autores consideram, ainda, que a pdf da distribuição- t de Student com ν graus de liberdade, quando o número n de observações independentes da variável aleatória e suficientemente grande, pode ser aproximada pela pdf normal. Esse fato é empregado em algumas situações práticas, como no caso do cálculo da incerteza padrão expandida, analisado mais à frente. “Como a distribuição normal, a distribuição- t de Student é importante na teoria estatística, e é encontrada com frequência disponível em tabelas” (PAPOULIS e PILLAI, 2002, p. 207).

A pdf retangular, por sua vez, é aplicada quando a única informação disponível sobre a grandeza X_i é que seu valor mais provável está dentro do intervalo q_a e q_b , e que a probabilidade de que a grandeza assuma valores fora desse intervalo é igual a zero (LIRA, 2002; ABNT e INMETRO, 2003). Nesse caso, não havendo *conhecimento específico* sobre os valores possíveis de X_i dentro do intervalo, pode-se apenas supor que é igualmente provável que X_i esteja em qualquer lugar dentro dele (ABNT e INMETRO, 2003). A esperança de X_i é, então, o ponto médio do intervalo $x_i = (q_a + q_b)/2$ com variância:

$$u^2(x_i) = (q_b - q_a)^2 / 12. \quad (2.17)$$

Portanto, se a diferença entre q_b e q_a é igual a 2δ , e a pdf tem valor uniforme igual a $1/2\delta$ para o intervalo considerado, a equação (2.17) torna-se:

$$u^2(x_i) = \delta^2 / 3. \quad (2.18)$$

Finalmente, o GUM recomenda que a pdf triangular deve ser usada no caso da probabilidade da ocorrência de X_i ser menor próximo aos limites do intervalo (q_a, q_b) do que na região central do intervalo. Para tal pdf, que também é simétrica, o valor esperado x_i corresponde à média μ da variável aleatória associada à q (ou X_i) que ocorre no centro do intervalo. O pico da pdf ocorre para o valor de abscissa x_i e é igual a $1/\delta$ para um intervalo de comprimento δ . Nessa condição:

$$u^2(x_i) = \delta^2 / 6. \quad (2.19)$$

FERRERO e SALICONE (2006) salientam que o GUM preconiza que o método para expressar incerteza deve prover também um intervalo de cobertura que é um intervalo em torno do resultado de medição que abrange os valores que poderiam ser razoavelmente atribuídos ao mensurando de acordo com uma determinada probabilidade de abrangência. Em

outras palavras, tal probabilidade de abrangência estabelece a probabilidade de que os valores atribuídos ao mensurando estejam dentro do intervalo de cobertura.

Partindo desse princípio, o GUM analisa que a incerteza x_i não é, necessariamente, dada como múltiplo de um desvio padrão. Ao invés disso, a incerteza citada pode ser declarada definindo-se um intervalo tendo uma probabilidade de abrangência, por exemplo, de 90, 95 ou 99%. Segundo o GUM, a não ser quando indicado de forma diferente, pode-se supor que foi usada uma distribuição normal para calcular a incerteza citada e recuperar, assim, a incerteza padrão de x_i , dividindo-se aquela incerteza por um fator de abrangência k apropriado para a distribuição normal. No sentido inverso, pode-se encontrar a largura do intervalo de cobertura por meio da multiplicação da incerteza padrão por um fator de abrangência conveniente. Para ilustrar esse procedimento, FERRERO e SALICONE (2006) apresentam as distribuições de probabilidade indicadas nas figuras 2.3 e 2.4.

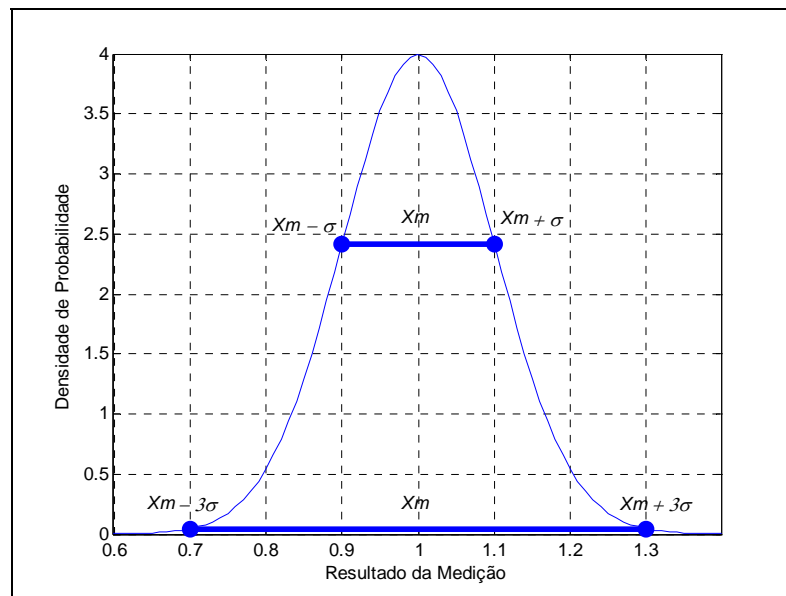


Figura 2.3: Exemplo da determinação do intervalo de cobertura de um dada pdf: X_m é a média e σ , o desvio padrão – modificado após FERRERO E SALICONE (2006).

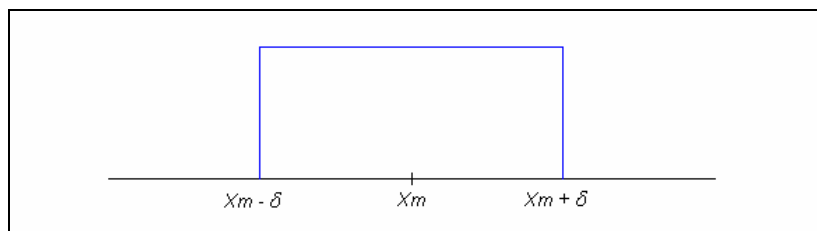


Figura 2.4: Exemplo da determinação da incerteza padrão para uma pdf uniforme de uma medição, dado um intervalo de cobertura – modificado após FERRERO E SALICONE (2006).

Para a distribuição normal apresentada na Figura 2.3, com média igual a X_m e desvio padrão igual a σ , se o fator de abrangência k é tomado igual a 1, um intervalo $X_m \pm \sigma$ é obtido e a probabilidade de abrangência é 68,3%. Se $k = 2$, então o intervalo de cobertura é $X_m \pm 2\sigma$, e a probabilidade de abrangência sobe para 95%. De modo similar, se $k = 3$, o intervalo de cobertura torna-se $X_m \pm 3\sigma$, e a probabilidade de abrangência passa para 99,7%.

No caso da distribuição uniforme da Figura 2.4, a probabilidade de abrangência é considerada 100% para todo o intervalo $X_m \pm \delta$. Uma densidade de probabilidade uniforme é geralmente assumida para a maioria dos casos práticos e a incerteza padrão associada é calculada, conforme já indicado, pela raiz quadrada de $u^2(x)$ de (2.18), ou seja, $u(x_i) = \delta / \sqrt{3}$.

2.4.1.4 Incerteza padrão combinada

De acordo com o GUM (ABNT e INMETRO, 2003), a incerteza padrão de y , onde y é a estimativa do mensurando Y , é obtida pela combinação apropriada de incertezas padrão das estimativas de entrada x_1, x_2, \dots, x_N . Esta *incerteza padrão combinada* da estimativa y , representada por $u_c(y)$, é obtida a partir da aplicação da *lei de propagação da incerteza* (apresentada adiante).

Portanto, para o cálculo da incerteza de medição de um sistema de medição, deve-se, inicialmente, procurar estabelecer uma relação funcional f que relacione o mensurando Y , com as N grandezas de entrada do sistema X_1, X_2, \dots, X_N , ou seja:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N). \quad (2.20)$$

Segundo o GUM, as grandezas de entrada X_1, X_2, \dots, X_N , das quais Y depende, podem, elas mesmas, ser consideradas como mensurandos e depender de outras grandezas, incluindo-se correções e fatores de correção para efeitos sistemáticos. A função f , inclusive, poder ser determinada numericamente. Se dados apontam que f não modela a medição no grau imposto pela exatidão requerida do resultado da medição, devem-se incluir grandezas de entrada adicionais em f de forma que tal inadequação seja eliminada.

O conjunto de grandezas de entrada X_1, X_2, \dots, X_N , pode, ainda, de acordo com o GUM (ABNT e INMETRO, 2003, p. 9), ser dividido pelas seguintes categorias:

- a) grandezas cujos valores e *incertezas* podem ser diretamente determinadas na medição em curso. Estes valores e incertezas podem ser obtidos, por exemplo, de uma única observação, de observações repetidas, ou de julgamento baseado na experiência, e podem envolver a determinação de correções a leituras de instrumentos e correções por conta de grandezas de influência, tais como temperatura ambiente, pressão barométrica e umidade;
- b) grandezas cujos valores e *incertezas* são incorporados à medição a partir de fontes externas, tais como grandezas associadas com padrões de medição calibrados, materiais de referência certificados e dados de referência obtidos de manuais técnicos.

De outro modo, as grandezas a que se referem as categorias descritas acima podem ser encontradas tanto por meio de avaliações do Tipo A quanto do Tipo B.

A estimativa de saída y , que é o resultado da medição, é dada por ABNT e INMETRO (2003):

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N). \quad (2.21)$$

FERRERO e SALICONE (2006) descrevem que a lei de propagação da incerteza está relacionada com a hipótese do teorema do limite central. Se $Y = c_1 X_1 + c_2 X_2 + \dots + c_N X_N = \sum_{i=1}^N c_i X_i$ e todos X_i são caracterizados por distribuições normais, então a distribuição convolucionada resultante de Y também será normal. O teorema do limite central (PAPOULIS e PILLAI, 2002) estabelece que a distribuição de Y será aproximadamente normal se os X_i são independentes e a variância de Y é muito maior que os componentes individuais c_i^2 multiplicados por $Var(X_i)$ (ABNT e INMETRO, 2003). FERRERO e SALICONE (2006) analisam, ainda, que outras condições apontam para o caso em que a hipótese do teorema do limite central é satisfeita: a relação f é linear (ao menos em um intervalo apropriado para a incerteza da medição, que geralmente ocorre quando as incertezas são razoavelmente pequenas); o número N de resultados de medição x_i tende para o infinito (ou ao menos é grande o suficiente para se aproximar desta condição).

Com efeito, se os requisitos, descritos acima, são respeitados, o resultado final y pode ser suposto como sendo normalmente distribuído e uma aproximação de primeira ordem da série de Taylor de (2.20) expressa o que é denominado como *lei de propagação da incerteza* (ABNT e INMETRO, 2003; FERRERO e SALICONE, 2006); por meio da qual, pode-se

calcular a incerteza padrão combinada para essa distribuição, que é a raiz quadrada positiva da variância combinada $u_c^2(y)$:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j). \quad (2.22)$$

Nesta expressão, $u(x_i, x_j) = u(x_j, x_i)$ é a covariância de x_i em relação a x_j . Caso os resultados de medição sejam independentes, isto é, totalmente não-correlacionados, $u(x_i, x_j)$ torna-se zero e, assim, a incerteza padrão combinada passa a ser dada por:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i). \quad (2.23)$$

2.4.1.5 Incerteza padrão expandida

O GUM argumenta que, embora a incerteza padrão $u_c(y)$ possa ser universalmente usada para expressar a incerteza de um resultado de medição, em algumas aplicações comerciais, industriais e regulamentadoras, e quando a saúde e a segurança estão em questão, é muitas vezes necessário dar uma medida da incerteza, que defina o intervalo de cobertura com o qual se espera abranger a extensa fração da distribuição de valores que poderiam ser razoavelmente atribuídos ao mensurando (ABNT e INMETRO, 2003). Dessa forma, o GUM decidiu por adotar uma medida adicional de incerteza que satisfaça o requisito acima, denominada *incerteza padrão expandida*, representada por U . Para encontrar o seu valor, utiliza-se, portanto, a noção de intervalo de cobertura, discutida anteriormente, bastando multiplicar a incerteza padrão combinada $u_c(y)$ pelo fator de abrangência k apropriado, ou seja:

$$U = k u_c(y). \quad (2.24)$$

O resultado de uma medição é convenientemente expresso, então, como $Y = y \pm U$, que é interpretado de forma a significar que a melhor estimativa do valor atribuível ao mensurando Y é y , e que $y - U$ a $y + U$ é um intervalo com o qual se espera abranger uma extensa fração da distribuição de valores que podem ser razoavelmente atribuídos a Y . Tal intervalo é também expresso como $y - U \leq Y \leq y + U$ (ABNT e INMETRO, 2003, p. 23).

Conforme é discutido no GUM, o valor de k é escolhido baseado na probabilidade de abrangência requerida para o intervalo $y - U$ a $y + U$. Em geral, k está entre 2 e 3, mas para aplicações especiais, valores fora desta faixa podem ser fixados. “Uma extensa experiência e

o conhecimento pleno da utilização que se fará de um resultado de medição poderão facilitar a escolha de um valor apropriado de k ” (ABNT e INMETRO, 2003, p. 24).

A escolha de um valor específico de k que proporcione um determinado intervalo de cobertura com uma dada probabilidade de abrangência p , tal como 95 ou 99%, na prática, não é fácil de se fazer porque requer um extenso conhecimento da distribuição de probabilidade caracterizada pelo resultado da medição y e sua incerteza padrão combinada $u_c(y)$. O GUM salienta, ainda, que “embora esses parâmetros sejam de importância crítica, eles são, por si próprios, insuficientes para o propósito de estabelecer intervalos tendo probabilidades de abrangência exatamente conhecidas” (ABNT e INMETRO, 2003, p. 24).

Portanto, um determinado fator de abrangência k_p que fornece um intervalo tendo uma probabilidade de abrangência p , próxima a um nível especificado, pode somente ser encontrado se houver um completo conhecimento da distribuição de probabilidade de cada grandeza de entrada e se estas distribuições forem combinadas para se obter a distribuição da grandeza de saída. As estimativas de entrada x_i e suas incertezas padrão $u(x_i)$ são inadequadas para esse propósito.

O GUM argumenta que em razão do grande volume de cálculo requerido para combinar distribuições de probabilidade ser raramente justificável pela extensão e confiabilidade da informação disponível, é aceitável uma aproximação da distribuição da grandeza de saída. Como consequência do teorema do limite central, uma primeira aproximação razoável para o cálculo de uma incerteza expandida $U_p = k_p u_c(y)$, que irá proporcionar um intervalo com probabilidade de abrangência p , é usar, para k_p , um valor da distribuição normal. Entretanto, é geralmente suficiente supor que a distribuição de probabilidade da variável $(y - Y)/u_c(y)$ é a distribuição- t ou distribuição de Student (ABNT e INMETRO, 2003; PAPOULIS e PILLAI, 2002), com $\nu = n - 1$ graus de liberdade, onde n é o número de observações repetidas e independentes X_k de X , sendo X estimado pela média X_m e o mensurando Y estimado por $y = X$. Basta, então, tomar o valor de $k_p = t_p(\nu_{eff})$, com o fator- t t_p baseado nos graus efetivos de liberdade ν_{eff} de $u_c(y)$, obtidos por meio da fórmula de Welch-Satterthwaite:

$$\nu_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{\nu_i}}. \quad (2.25)$$

A incerteza expandida $U_p = k_p u_c(y) = t_p(\nu_{eff}) u_c(y)$, então fornece um intervalo $Y = y \pm U_p$ tendo uma probabilidade de abrangência aproximadamente p (ABNT e INMETRO, 2003).

Conforme descrito no GUM, os graus de liberdade ν são iguais a $n - 1$ para uma grandeza única estimada pela média aritmética de n observações independentes. Esse é o caso aplicado quando $u(x_i)$ é obtido por meio de uma avaliação do Tipo A. Se n observações independentes são usadas para se determinar a inclinação como o intercepto de uma linha reta pelo método dos mínimos quadrados, o grau de liberdade de suas respectivas incertezas padrão é $\nu = n - 2$. Com efeito, para um ajuste pelos mínimos quadrados de m parâmetros para n pontos de dados, o grau de liberdade da incerteza padrão de cada parâmetro é $\nu = n - m$. Se $u(x_i)$ é obtido por meio de uma avaliação do tipo B e pode ser tratado como exatamente conhecido, como é freqüentemente o caso na prática, considera-se $\nu_i \rightarrow \infty$. Caso contrário, ν_i é estimado pela seguinte equação (ABNT e INMETRO, 2003):

$$\nu_i \approx \frac{1}{2} \frac{u^2(x_i)}{\sigma^2[u(x_i)]} \approx \frac{1}{2} \left[\frac{\Delta u(x_i)}{u(x_i)} \right]^{-2}. \quad (2.26)$$

“A grandeza entre colchetes maiores é a incerteza relativa de $u(x_i)$; para uma avaliação do tipo B da incerteza padrão, é uma grandeza subjetiva cujo valor é obtido por julgamento científico baseado no conjunto de informações disponíveis” (ABNT e INMETRO, 2003, p. 65).

2.4.2 Outros aspectos importantes relacionados à avaliação da incerteza da medição

De acordo com LIRA (2002), as incertezas padrão Tipo A e Tipo B e a incerteza padrão expandida associada à melhor estimativa do mensurando estão associadas à função densidade de probabilidade, pdf. De forma sucinta, a pdf descreve a forma como os valores atribuídos ao mensurando estão distribuídos em torno da média. Conforme foi discutido, ainda, as pdfs normal e uniforme aparecem com mais freqüência nas aplicações metrológicas e “têm sido usadas de forma bastante intuitiva [...]. Entretanto, a obtenção da pdf mais apropriada para uma aplicação geral não é normalmente uma tarefa fácil” (LIRA, 2002, p. 166). Esse autor apresenta uma maneira de se obter a pdf mais adequada para expressar o que se sabe sobre o mensurando, antes e após as medições, baseada no teorema de Bayes. COX e HARRIS (2006) salientam que a propagação de distribuições pode em alguns casos especiais ser feita de forma analítica, utilizando-se o método de Monte Carlo. O Suplemento 1 do GUM foi lançado em

2007 na tentativa de preencher algumas lacunas deixadas no GUM para o caso de se desconhecer a pdf mais apropriada. Na literatura, ainda, foram propostas outras metodologias com o objetivo de sanar as deficiências do GUM e, segundo FERRERO e SALICONE (2005), entre as mais significativas também estão aquelas baseadas em variáveis fuzzy e variáveis fuzzy-aleatórias.

2.4.2.1 Suplemento 1 do GUM

Em 1997, um Comitê Conjunto para Guias em Metrologia (JCGM) foi criado pelas sete organizações internacionais que em 1993 prepararam o GUM e o VIM. Àquelas entidades, juntou-se, mais tarde a ILAC (*International Laboratory Accreditation Cooperation*). O JCGM possui dois grupos de trabalho, sendo o primeiro responsável pela “expressão da incerteza da medição”, promovendo o uso do GUM e a preparação de suplementos e outros documentos para sua ampla aplicação; e o segundo grupo pelos “termos básicos e gerais em metrologia”, com a finalidade de revisar e promover o uso do VIM.

Em 2007, o JCGM lançou o Suplemento 1 do GUM (JCGM, 2007), no qual o método de Monte Carlo é proposto para propagação de funções densidade de probabilidade, e a estatística bayesiana é utilizada para obtenção da pdf de uma grandeza. O objetivo deste suplemento é apresentar uma alternativa prática para a metodologia de avaliação das incertezas do GUM nas seguintes situações: (a) a linearização do modelo utilizado provê uma representação inadequada ou (b) a função densidade de probabilidade (pdf) para a grandeza de saída difere, apreciavelmente, da distribuição Gaussiana ou de uma distribuição-*t*. “No caso (a), a grandeza de saída e a incerteza padrão combinada avaliada pela metodologia do GUM não pode ser confiável. Para o caso (b), intervalos de cobertura irrealis (uma generalização da ‘incerteza expandida’ na metodologia para avaliação da incerteza do GUM) serão encontrados” (JCGM, 2007, p. vi).

COX e HARRIS (2006) expõem outras circunstâncias em que a metodologia proposta no Suplemento 1 do GUM pode prover resultados mais confiáveis do que aquela proposta no GUM para cálculo da incerteza de medição:

- uma ou mais contribuições de incerteza são arbitrariamente grandes;
- as contribuições de incerteza não são comparáveis em magnitude;

- a melhor estimativa da grandeza de saída e a incerteza padrão associada são comparáveis em magnitude;
- distribuições assimétricas para os valores das grandezas de entrada aumentam, por exemplo, quando se lida com as magnitudes de variáveis complexas em metrologia acústica, elétrica e ótica;
- é difícil ou inconveniente encontrar as derivadas parciais do modelo ou aproximações numéricas para essas derivadas parciais (conforme enunciado no próprio GUM – possivelmente em termos de ordem mais elevada).

2.4.2.2 Inferência bayesiana

Segundo LIRA (2002), o teorema de Bayes pode ser usado para se obter a pdf mais adequada para expressar o conhecimento que se tem a respeito do mensurando. LIRA e WÖGER (2006) argumentam que esse método tem algumas vantagens sobre o método estatístico convencional apresentado no GUM. Uma delas é que a inferência bayesiana trata de efeitos sistemáticos e aleatórios da mesma maneira. Além disso, esses autores julgam que o método baseado em estatística bayesiana é mais flexível e melhor adaptado à prática do que a teoria estatística convencional.

LIRA e WÖGER reforçam a idéia de que o GUM deveria ser revisado e passasse a ser baseado unicamente em método bayesianos. Segundo esses mesmos autores, essa opinião é controversa, pois há adeptos da linha teórica convencional que rejeitam algumas interpretações da escola bayesiana.

A diferença básica entre as estatísticas convencional e bayesiana é sua diferente interpretação para distribuições de probabilidade. Na teoria convencional, medições repetidas são tratadas assumindo-se que o processo de medição é governado por modelos estatísticos que traduzem uma pdf cujos parâmetros podem ser estimados dos dados [...]. O resultado da medição é o valor encontrado por meio do estimador e a incerteza é a estimativa do desvio padrão do estimador. Na teoria bayesiana, o processo de medição é governado por modelos de probabilidade que dependem de grandezas. O estado de conhecimento sobre essas grandezas é inferido dos dados utilizando-se o teorema de Bayes, levando-se em conta qualquer informação prévia disponível sobre as grandezas envolvidas. Em metrologia, o resultado de medição é muitas vezes reportado como a expectativa da pdf que traduz o estado de

conhecimento sobre a grandeza de interesse, enquanto a incerteza padrão é considerada como sendo igual ao desvio padrão da mesma pdf (LIRA e WÖGER, 2006, p. S258).

2.4.2.3 Variáveis fuzzy e variáveis fuzzy-aleatórias

FERRERO (2007) e FERRERO e SALICONE (2005) discutem uma metodologia baseada em variáveis fuzzy (FV) e variáveis fuzzy-aleatórias (RFV) para expressão da incerteza da medição.

Variáveis fuzzy aparecem como sendo um método muito promissor para expressar uma gama inteira de intervalos de cobertura, em vários níveis de probabilidade de abrangência, que podem ser associados ao resultado da medição. Elas oferecem um objeto matemático único para representar um resultado de medição e também a dispersão de valores que razoavelmente podem ser atribuídos ao mensurando para uma determinada probabilidade de abrangência (FERRERO, 2007, p. 6).

Esse autor salienta que VFs são úteis para representar resultados de medição em presença de efeitos sistemáticos desconhecidos ou descompensados. No entanto, elas não oferecem uma representação correta quando efeitos aleatórios estão presentes.

Uma solução mais efetiva que considera a presença de ambos os efeitos pode ser construída por meio da teoria da evidência que é o método das variáveis fuzzy-aleatórias (FERRERO, 2007; FERRERO e SALICONE, 2005). “RFVs podem ser convenientemente empregadas para expressar o resultado de medição junto com sua incerteza associada e processá-los em medições indiretas [...] em uma gama enorme de intervalos de cobertura para todas as possíveis probabilidades de abrangência” (FERRERO, 2007, p. 8).

CAPÍTULO III

MATERIAIS E MÉTODOS

Em julho de 2006, foi apresentado um equipamento desenvolvido pelo Núcleo de Estudos e Pesquisa em Engenharia Biomédica da EEUFMG (NEPEB/EEUFMG), resultado de uma parceria e entre os Departamentos de Engenharia Elétrica e Fisioterapia da EFITO/UFMG, caracterizado por um sistema de medição digital das pressões respiratórias máximas PEmax (pressão expiratória máxima) e PImax (pressão inspiratória máxima) exercidas pelos músculos do sistema respiratório – *manovacuometria* (SILVA, 2006).

Foi realizada uma calibração inicial do medidor, mas não houve, até aquela data, nenhum estudo sobre modelos que pudessem descrever características metrológicas referentes ao funcionamento do equipamento, de forma que a qualidade e a confiabilidade dos resultados obtidos não foram verificadas. A necessidade de estabelecer essa verificação, por conseguinte, gerou o escopo deste trabalho, ora apresentado.

A seguir, são descritas algumas características do manovacuômetro digital do NEPEB, justificando-se, por meio de considerações fisiológicas e clínicas, a importância da construção e da utilização de um EMH deste tipo. Na seqüência, são apresentadas tanto a metodologia empregada para levantarem-se os dados experimentais quanto a base metodológica utilizada para que, a partir deles, fossem implementadas a calibração e o cálculo da incerteza de medição do medidor digital de pressões respiratórias máximas.

3.1 O Equipamento do NEPEB sob Avaliação Metrológica: o Medidor Digital de Pressões Respiratórias

A medição da pressão respiratória máxima durante a inspiração – PImax e durante a expiração – PEmax caracteriza uma importante variável para o diagnóstico funcional dos músculos respiratórios. A medida reflete a força máxima que os músculos do sistema respiratório são capazes de exercer. Com isso, a avaliação de pacientes com a disfunção respiratória de

etiologia muscular quanto da progressão de doenças neuromusculares pode ser quantificada (PEREIRA, 2004). Estas pressões podem ser utilizadas também para avaliação de alterações de força muscular durante o processo de envelhecimento. GUIMARÃES *et al.* (2007) expõem a utilidade da medida da P_Imax em pacientes ventilados mecanicamente, demonstrada através do uso dos valores obtidos para predição do sucesso do desmame da ventilação mecânica. PEREIRA (2004) confirma essa idéia:

Essa informação pode ter um papel prognóstico importante. A medida das pressões respiratórias máximas pode auxiliar na avaliação da capacidade de proteção das vias aéreas (por exemplo, capacidade de gerar tosse adequada), para predizer o sucesso ou não do desmame da ventilação mecânica e para avaliar a gravidade e a progressão de fraqueza neuromuscular em diversas condições (LAGHI e TOBIN, 2003 *apud* PEREIRA, 2004, p. 321).

A eficiência de um tratamento fisioterápico, da mesma maneira, pode ser avaliada com tal medição. Além disso, trata-se de uma maneira simples, não-invasiva e reproduzível para a quantificação da força dos músculos do sistema respiratório (BLACK e HYATT, 1969). Tais fatores caracterizam a P_Imax e P_Emax como importantes medidas em estudos e tratamentos de afecções do sistema respiratório. De acordo com MUNIZ (2007, p. 40):

Para a medida de P_Imax, o sujeito deve expirar até o volume residual do pulmão. No momento em que isso acontece, o orifício do tubo é ocluído e o esforço inspiratório máximo deve ser feito. Durante a realização da medida de P_Emax, o sujeito deve inspirar até a capacidade pulmonar total. Analogamente à [medição de] P_Imax, neste momento a via aérea é ocluída e o esforço expiratório máximo deve ser executado. Para que não haja vazamentos, o sujeito deve utilizar um clipe nasal e pode segurar a musculatura da face (perioral).

As pressões respiratórias máximas podem ser medidas por meio de instrumentos denominados *manovacuômetros*. Os manovacuômetros são construídos de modo que possam medir tanto pressões positivas (manômetro) quanto pressões negativas (vacuômetro), e podem ser tanto do tipo analógico como do tipo digital.

Quando comparados aos manovacuômetros digitais, os modelos analógicos possuem algumas limitações, como as listadas a seguir: possuem um procedimento de calibração complexo por se tratar de um equipamento cujo princípio de medição é mecânico (INMETRO, 2006). Tal procedimento não é acessível aos seus usuários e somente pode ser executado pelo fabricante. A leitura dos valores de P_Imax e P_Emax é dificultada devido ao fato de o sujeito examinado

conseguir exercer a pressão máxima durante um pequeno período de tempo. A leitura dos valores, ainda, exige uma boa cooperação por parte do paciente para que os resultados sejam confiáveis (GUIMARÃES *et al.*, 2007; PEREIRA, 2004). A pessoa que efetua a medição deve, portanto, ficar extremamente atenta ao valor indicado, aumentando a subjetividade da medida e erros de leitura. A faixa de medição dos manovacuômetros para avaliação de força muscular é pequena (até aproximadamente 29,4 kPa^{*}) e às vezes insuficiente para certos tipos de indivíduo, por exemplo, atletas.

Ambos os tipos de manovacuômetro, digitais e analógicos, comumente encontrados no mercado, apresentam a desvantagem de realizarem apenas a medição pontual da pressão inspiratória máxima e da pressão expiratória máxima. Não possibilitam, por exemplo, que seja traçada uma curva de pressão desde o início até o final dos procedimentos aos quais o paciente é submetido durante a medição. Em SILVA (2006), o traçado da curva de pressão permitiu que fossem visualizadas determinadas características da curva (tempo de subida, pico, região de platô) que não são possíveis de serem observadas por meio da medição pontual.

Em face às dificuldades encontradas nos sistemas comerciais de medição das pressões respiratórias, o NEPEB/UFMG optou por desenvolver um sistema digital próprio para a medição de PEmax e PImax com o propósito de que, no protótipo a ser construído, fossem minimizadas ou eliminadas as referidas limitações.

O manovacuômetro digital desenvolvido pelo NEPEB, apresentado pela primeira vez em um trabalho publicado em julho de 2006 (SILVA, 2006), é assim referido por MUNIZ (2007, p. 20): “consiste em um sistema formado por dois sensores de pressão diferencial, que são responsáveis por medir a diferença de pressão exercida pelo sujeito no ato do exame de inspiração ou expiração máximas e a pressão atmosférica”.

O equipamento inclui um módulo de aquisição dos sinais analógicos de pressão e um módulo de conversão do sinal analógico para digital (Figura 3.1), permitindo que os dados digitalizados sejam adquiridos por qualquer microcomputador PC através de sua interface USB, amplamente disseminada. Essas e outras características do sistema de medição implementado no laboratório do NEPEB são apresentadas a seguir.

* No Anexo B, é apresentada uma tabela para conversão entre algumas unidades de pressão.



Figura 3.1: Manovacuômetro digital desenvolvido pelo NEPEB (MARCONI *et al.*, 2007). À esquerda, o módulo de aquisição analógico de pressão; à direita, o módulo de conversão A/D.

3.1.1 O módulo de aquisição analógico de pressão

No módulo de aquisição dos sinais analógicos de pressão, que desempenha a função de manovacuometria propriamente dita, estão localizados os dois sensores de pressão diferencial (o primeiro, utilizado para medição de P_{Imax} e o outro, para medição de P_{Emax}), modelo MPX5050, do fabricante FREESCALE SEMICONDUCTOR INC. (Austin, Texas). Algumas características desse sensor podem ser encontradas na Tabela 3.1, a seguir, retirada de FREESCALE (2004) – vide Anexo A.

Tabela 3.1: Características do sensor MPX5050 (FREESCALE, 2004).

| Característica | Símbolo | Mínimo | Média | Máximo | Unidade |
|---|-----------|--------|---------|----------|-------------|
| Faixa de variação de pressão | P_{CP} | 0 | - | 50 | kPa |
| Tensão de alimentação | V_F | 4,75 | 5,00 | 5,25 | Vdc |
| Corrente de alimentação | I_o | - | 7,0 | 10,0 | mAdc |
| Offset de pressão mínima (0 to 85°C) @ $V_F = 5,0$ Volts | V_{off} | 0,088 | 0,20 | 0,313 | Vdc |
| Saída de fundo de escala (0 to 85°C) @ $V_F = 5,0$ Volts | V_{FSO} | 4,587 | 4,70 | 4,813 | Vdc |
| Span de fundo de escala (0 to 85°C) @ $V_F = 5,0$ Volts | V_{FSS} | - | 4,5 | - | Vdc |
| Exatidão (0 to 85°C) | - | - | - | +/- 2,5% | V_{FSS} |
| Sensitividade | V/P | - | 90 | - | mV/kPa |
| Tempo de resposta | t_R | - | 1,0 | - | ms |
| Corrente de saída de fundo de escala | I_{o+} | - | 0,1 | - | mAdc |
| Tempo de <i>Warm-Up</i> | - | - | 20 | - | ms |
| Estabilidade de <i>offset</i> | - | - | +/- 0,5 | - | % V_{FSS} |

O sensor possui duas tomadas de pressão (Figura 3.2) e o valor medido corresponde à pressão diferencial entre essas duas tomadas.

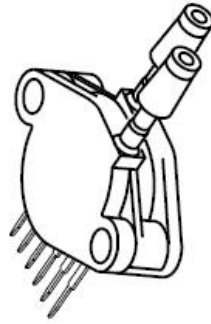


Figura 3.2: Sensor MPX5050 da FREESCALE.

É importante salientar, todavia, que a pressão em uma das tomadas (P1) deve ser sempre maior que na segunda (P2). No caso da medição das pressões respiratórias, portanto, em P1 é aplicada a pressão exercida pelo indivíduo, para a medição de P_Emax (sensor 1); ou a pressão atmosférica, quando da medição de P_Imax (sensor 2). Essa condição está representada na Figura 3.3.

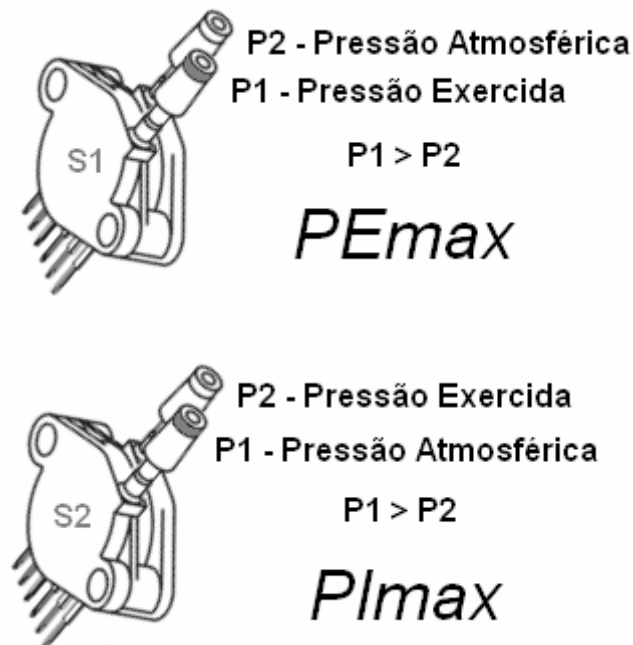


Figura 3.3: Utilização dos sensores para medição de P_Emax e P_Imax. S1: sensor 1; S2: sensor 2 – modificado de SILVA (2006).

O sensor de pressão MPX5050 é piezorresistivo; ou seja, uma vez aplicado um valor de pressão em sua entrada, é gerada uma variação na resistência do elemento sensível (*strain-gauge*) que possibilita uma mudança na tensão de saída. O *strain-gauge* é implantado ionicamente em um diafragma de silicone. Ele é integralmente

composto também de silicone monolítico. Isso permite que não haja efeitos da temperatura pelas diferentes expansões térmicas do diafragma e do *strain-gauge*. Todavia, existe uma compensação de temperatura no sensor que se deve aos seus outros elementos. Essa compensação permite a utilização do sensor em aplicações com variação de temperatura de 0 a 85°C (SILVA, 2006, p. 21).

Quando o sensor está submetido a diferentes valores de pressão ($P_1 > P_2$), o diafragma distende-se e, como consequência, o *strain-gauge* muda seu valor resistivo, gerando uma variação de tensão na saída. Utiliza-se apenas um *strain-gauge*, o que torna desnecessário o pareamento entre mais elementos sensitivos ou de calibração quando é utilizada uma ponte de Wheatstone. O *offset* dependente apenas de quão alinhada está a tensão transversa. Após ser gerado no elemento sensitivo, o sinal é posteriormente amplificado. A faixa de tensão de saída fica condicionada a, aproximadamente, 0,2 a 5 V. Tal característica dispensa, *a posteriori*, uma amplificação externa (SILVA, 2006).

SILVA emenda, relatando que as características do sensor utilizado satisfazem os requisitos especificados para o sistema cujo fundo de escala mínimo estipulado foi de 39,2 kPa. Conforme afirma WEBSTER (1998), a faixa de variação do fluxo respiratório varia de 0 a 40 Hz. Dessa forma, um filtro passa-baixa, com frequência de corte de 40 Hz, foi colocado nas saídas dos sensores.

3.1.2 O módulo de conversão A/D do sinal de tensão

Para a conversão analógico/digital (A/D) do sinal de tensão proveniente do módulo de aquisição analógico de pressão, utilizou-se o microcontrolador PIC18F4550 da MICROCHIP (PIC18FUSB, 2007). Esse microcontrolador possui um conversor A/D de 13 canais, 10 bits efetivos e emula o protocolo de comunicação RS232 através da porta USB (MICROCHIP, 2007a, 2007b). No projeto desenvolvido para aquisição de sinais da pressão pulmonar, são utilizados dois canais, um para a inspiração e outro para a expiração.

A frequência de amostragem utilizada é de 1000 Hz (respeitando-se o teorema de Nyquist). Após ser digitalizado, o sinal é transmitido ao computador através da porta USB. “A coleta dos dados é realizada através da porta USB, por ser mais rápida e fácil de ser manuseada em relação às portas serial e paralela além de outras vantagens como ser *plug n’ play* e *hot swappable* (pode ser conectada/desconectada) com o computador ligado” (MUNIZ, 2007, p. 23).

O módulo de conversão analógico/digital (A/D) é caracterizado como um sistema embutido que apresenta um *software* dedicado (*firmware*) e *hardware* projetado especificamente para a aquisição dos sinais biomédicos. A versão atual do *firmware* permite a aquisição de sinais elétricos provenientes de dois canais com sinais de 0 a 5 V e frequência de amostragem de até 2,5 kHz por canal.

Na Figura 3.4, é exibido o esquema de como é feito o registro do sinal, desde sua conversão de sinal analógico para sinal digital, até, por fim, ser mostrado em um programa de interface gráfica com o usuário na tela do computador. Na interface gráfica, portanto, são lidos os valores correspondentes à tensão na saída dos sensores. O programa de interface permite também que os valores lidos sejam armazenados em arquivos do tipo ‘.txt’.

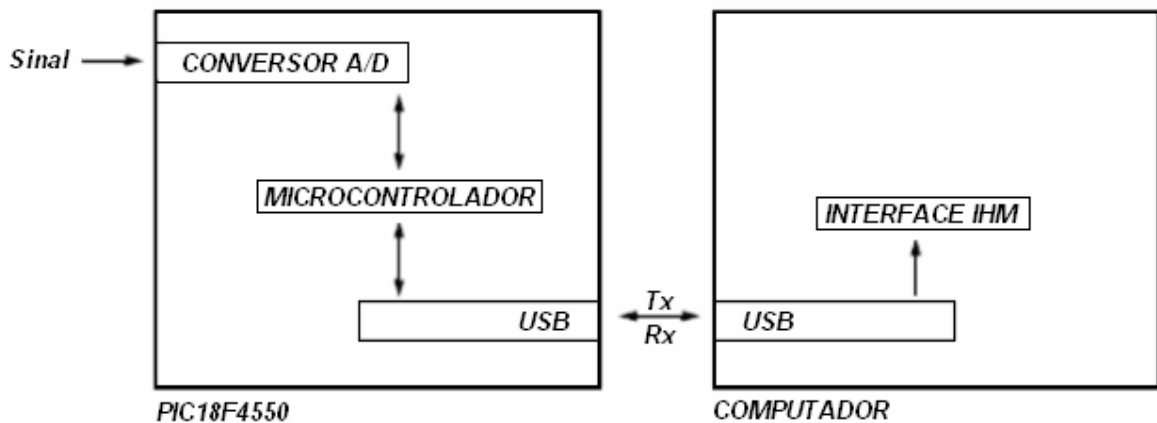


Figura 3.4: Etapas desde a aquisição do sinal analógico até sua exibição no programa de interface com o usuário na tela do micro. Tx: transmissão; Rx: recepção.

3.2 Metodologia Utilizada para Calibração e Cálculo da Incerteza da Medição

Na literatura metrológica, podem ser encontradas diferentes maneiras para se implementar a calibração e o cálculo da incerteza de medição por meio de modelos metrológicos (ABNT e INMETRO, 2003; COX e HARRIS, 2006; LIRA, 2002).

Para realização da calibração do manovacuômetro digital, foi proposto aqui, um modelo baseado no ajuste linear utilizando-se o método dos mínimos quadrados ponderado (WLS). Esse método apresenta algumas vantagens que, julgou-se, poderem ser aproveitadas devido às peculiaridades dos dados levantados durante as medições em laboratório realizadas pelo

manovacuômetro sob teste. Por exemplo, pelo método dos mínimos quadrados ponderado, as incertezas de dados experimentais são levadas em consideração no processo de determinação dos parâmetros do modelo; ele permite, ainda, que as incertezas desses parâmetros sejam calculadas durante a realização dos cálculos (MATHIOULAKIS e BELESSIOTIS, 2000). Uma vez implementada a calibração, procedeu-se à confrontação dos resultados obtidos com a curva de calibração apresentada pelo fabricante do sensor, empregado na construção do protótipo, em seu *datasheet*.

No caso da avaliação da incerteza da medição, foram propostos dois modelos, com a finalidade de se comparar o desempenho de cada um e sua maior ou menor adequação à aplicação em questão. O primeiro modelo foi baseado na equação referente à curva de calibração fornecida pelo fabricante para o sensor. O segundo foi construído com base na expressão obtida por meio do ajuste linear durante a calibração do equipamento.

A coleta de dados foi realizada duas vezes, levantando, assim, dois conjuntos de dados. As coletas foram realizadas no mês de abril e no mês de outubro de 2007, portanto, separadas por um período de cerca de seis meses. O processamento dos dados e cálculos matemáticos foi implementado por meio da ferramenta computacional MATLAB[®].

3.2.1 Protocolo utilizado para calibração do manovacuômetro

3.2.1.1 Levantamento dos pontos de calibração

O método de medição utilizado para o levantamento dos pontos de calibração do manovacuômetro digital, foi baseado no protocolo do “Procedimento de Verificação de Esfigmomanômetros do Tipo Aneróide” do INMETRO (INMETRO, 1997)*. Duas foram as motivações para o emprego de tal procedimento: (i) os esfigmomanômetros do tipo aneróide constituem um dos poucos equipamentos clínicos que até então possuem normalização, regulamentação e controle por parte do INMETRO; (ii) apesar daquela normalização ser especificada para os esfigmomanômetros do tipo aneróide, estes instrumentos realizam a medição do mesmo tipo de grandeza física que o manovacuômetro, ou seja, *pressão*.

* Em fevereiro de 2008, foi publicado o documento INMETRO (2008), que faz referência à norma americana ASME – B40-7 – 2005, como base para calibração dos medidores digitais de pressão (vacuômetro, manovacuômetro, manômetro). Entretanto, mesmo que a metodologia utilizada neste trabalho tenha sido implementada antes da publicação de INMETRO (2008), constatou-se que os procedimentos aqui adotados não transgridem as recomendações deste documento do INMETRO.

O procedimento de verificação preconiza a realização de ensaios a fim de que seja verificada a calibração. Nesse sentido, foram realizados o ensaio para determinação do erro máximo de indicação e o ensaio de histerese, propostos em INMETRO (1997).

O ensaio de histerese é realizado assim que o limite superior da escala de valores de pressão aplicados é atingido. Nesse momento, deve-se estrangular o ponto do circuito entre a bomba de ar e o manovacuômetro (Figura 3.5), visando manter os dois sensores por cinco minutos submetidos à pressão do limite da escala. A seguir, a pressão aplicada deve ser reduzida a zero e, decorridos os cinco minutos, ela deve ser novamente elevada ao limite superior da escala. Finalmente, o ponto de estrangulamento é desfeito e a pressão é aliviada até o penúltimo ponto verificado na pressão crescente, dando-se seqüência, então, ao ensaio do erro máximo de indicação. No caso do ensaio de histerese, para um determinado valor de pressão de referência, a diferença entre a pressão decrescente e a pressão crescente não pode ser superior a aproximadamente 0,5 kPa. Por sua vez, na determinação do erro máximo de indicação, a subtração entre os valores de pressão de referência e aqueles registrados na subida e na descida não pode ser superior aos erros máximos permitidos que devem situar-se na faixa compreendida entre -0,4 kPa e +0,4 kPa (INMETRO, 1997). Na Figura 3.5, é mostrado o esquema do circuito montado em laboratório para realização dos ensaios.

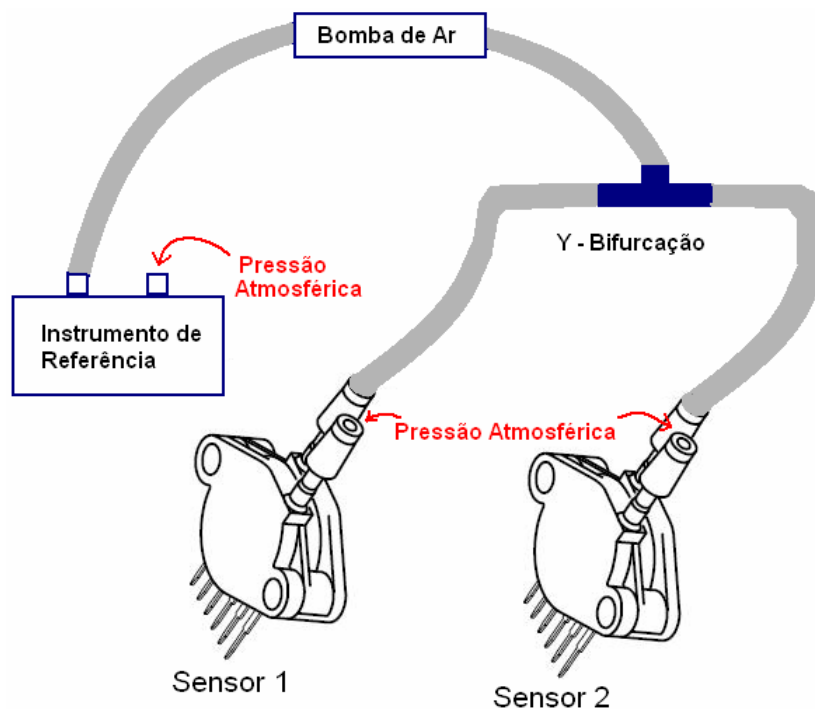


Figura 3.5: Esquema da montagem implementada para realização da calibração do protótipo.

Portanto, simultaneamente foram calibrados os dois sensores do manovacuômetro: a partir de uma bomba de ar foi insuflado ar no circuito, gerando uma pressão sobre a tomada de ar de cada sensor que deve ficar submetida à maior pressão (P1). As outras tomadas de ar ficaram submetidas à pressão atmosférica (P2). Em outra extremidade do circuito foi acoplado o instrumento de referência que, da mesma forma que os sensores, faz uma medição diferencial da pressão e, assim, teve uma das tomadas de leitura de pressão submetida à pressão injetada pela bomba e a outra tomada colocada sob a pressão atmosférica.

De acordo com o procedimento de verificação, devem ser aplicados ao medidor valores crescentes e decrescentes de pressão.

Onze valores* de pressão foram aplicados aos sensores, indicados na Tabela 3.2. Dentre esses valores, alguns são sugeridos por INMETRO (1997); outros foram acrescentados ao conjunto.

Tabela 3.2: Valores de pressão aplicados ao medidor.

| Pressão (kPa) | | |
|----------------------|------|------|
| 4,0 | 9,3 | 12,0 |
| 13,3 | 20,0 | 26,7 |
| 33,3 | 40,0 | 46,7 |
| 53,3 | 60,0 | |

Cada valor de pressão de referência foi aplicado durante cinco segundos. Para o valor de tensão correspondente registrado nas saídas dos sensores foi tomada a média dos valores lidos durante este intervalo de tempo. Os ensaios foram realizados quatro vezes† levantando-se, dessa forma, quatro curvas de subida e quatro curvas de descida da tensão de saída pela pressão aplicada.

O procedimento de medição usado para levantamento dos pontos de calibração está sintetizado por meio dos passos descritos a seguir:

1. Montou-se o esquema (circuito pneumático) mostrado na Figura 3.5.

* Não obstante o número de pontos de calibração levantados para cada curva ($J=11$) ter sido escolhido anteriormente à publicação de INMETRO (2008), tal quantidade é ainda superior àquela recomendada para o caso mais extremo considerado neste documento (avaliado de acordo com a classe de exatidão do instrumento), para o qual deve-se ter $J=10$.

† INMETRO (2008) recomenda que o “carregamento” e o “descarregamento” (aqui referidos como subida e descida, respectivamente) sejam realizados no mínimo duas vezes.

2. Foram aplicados os onze valores de pressão apresentados na Tabela 3.2. A aplicação dos valores de pressão foi feita considerando-se, simultaneamente, a realização do ensaio de histerese e do ensaio do erro máximo de indicação descritos em INMETRO (1997). A partir do valor de pressão igual a 0 kPa, a pressão foi elevada até o primeiro valor da escala a ser verificado. Então, aguardou-se a estabilização desse valor para se proceder à leitura do valor correspondente de tensão de saída em cada sensor. Gradualmente, o valor de pressão foi aumentado até que todos os pontos de pressão de referência fossem aplicados.
3. Nesse ponto, realizou-se o ensaio de histerese conforme descrito anteriormente. Em seguida, a pressão foi gradualmente abaixada e, novamente, foram registrados os valores de tensão lidos na saída dos sensores correspondentes a cada valor considerado da escala de pressão de referência. Atingido novamente o valor de pressão igual a 0 kPa, outro ciclo carregamento/descarregamento poderia ser iniciado.
4. Conforme relatado acima, o valor da pressão de referência estabilizado foi aplicado durante cerca de cinco segundos. Os valores de tensão correspondentes, lidos na tela do micro durante esse intervalo de tempo, foram armazenados em um arquivo do tipo ‘.txt’. Para efeito de valor de tensão lido a ser considerado, associado a um determinado valor de referência, foi tomada, então, a média dos valores de tensão armazenados no arquivo.

Salienta-se que o circuito pneumático foi montado sobre uma bancada em que não havia diferença de altura entre os seus componentes. Portanto, não se considerou a possível influência da diferença de pressão atmosférica resultante caso tal desnível existisse. O laboratório onde foi realizada a medição dispunha de condições ambientais controladas.

3.2.1.2 Método usado para calibração do manovacuômetro

Em posse das curvas obtidas, procedeu-se à calibração dos sensores por meio do ajuste utilizando-se regressão linear pelo método dos mínimos quadrados ponderado – WLS, apresentado anteriormente. Optou-se por realizar o ajuste para a média das quatro curvas de

subida e para a média das quatro curvas de descida de cada sensor*. Com efeito, foram ajustadas duas curvas (subida e descida) para o sensor 1 e duas curvas (subida e descida) para o sensor 2. A regressão linear foi escolhida por causa da grande linearidade apresentada pelos dados quando do traçado dos pontos de calibração. De acordo com MATHIOULAKIS e BELESSIOTIS (2000), este modelo é usado na maioria dos casos para correção da saída de um instrumento sob calibração.

3.2.2 Protocolo utilizado para cálculo da incerteza de medição

Para a avaliação da incerteza da medição do manovacuômetro digital, foi aplicada a metodologia apresentada no GUM (ABNT e INMETRO, 2003) para esse fim:

1. Procurou-se, inicialmente, determinar a relação funcional f entre o mensurando Y , que no caso é a pressão medida pelo sistema, e as grandezas de entrada, de acordo com (2.20).
2. Avaliou-se o valor estimado das grandezas de entrada X_i .
3. Foi calculada a incerteza padrão $u(x_i)$ de cada estimativa de entrada.
4. Conforme o caso, foi considerado, também o cálculo da covariância entre os parâmetros ou entre as grandezas de entrada do modelo.
5. Foi estimado o valor do mensurando a partir da relação funcional f e das estimativas das grandezas de entrada.
6. Determinou-se a incerteza padrão combinada $u_c(y)$, aplicando-se a lei de propagação da incerteza.
7. Finalmente, calculou-se a incerteza padrão expandida U_p , com base no valor encontrado para a incerteza padrão combinada e no fator de abrangência k determinado através da fórmula de Welch-Satterthwaite (2.25).

* Empregou-se a denominação *curva média* para se remeter ao conjunto de pontos de calibração formado pela média dos valores de tensão de saída (referidos ao mesmo valor da pressão de referência) levantados nas quatro vezes em que os valores de pressão foram elevados e, em seguida, abaixados durante a realização das medições.

Ressalta-se que, para implementação de ambos os modelos propostos para a avaliação da incerteza da medição, todos os passos acima foram cumpridos, mas, não necessariamente de acordo com a ordem indicada pela numeração.

Quanto aos fatores de influência considerados para o cálculo das incertezas associadas às estimativas das grandezas de entrada dos modelos propostos, foram selecionados, em princípio, aqueles julgados como mais determinantes para a avaliação. Dessa forma, considerou-se a variabilidade associada a medições repetidas (incerteza do Tipo A); fatores de influência informados no *datasheet* dos sensores, como a exatidão e a estabilidade de *offset*; a resolução de leitura para os valores de tensão coletados na saída dos sensores e registrados nos arquivos do tipo '.txt'. E outros, ainda, relacionados à variabilidade da fonte de alimentação, à incerteza e à resolução associada ao instrumento de referência e à incerteza referente aos parâmetros do modelo. Fatores de influência como a temperatura e o efeito da discretização causada no sinal devido à conversão A/D não foram relevados.

3.2.3 O instrumento calibrado utilizado como referência

O instrumento utilizado para medir a pressão aplicada ao protótipo do NEPEB foi um outro manovacuômetro digital (instrumento de referência – Figura 3.5) da marca ECIL PRODUTOS E SISTEMAS DE MEDIÇÃO E CONTROLE LTDA, modelo: IND. CAPPO P // MOD. BB 480003, número de série: IND. 53412 // MOD. 53314, cuja incerteza expandida de medição, informada no seu certificado de calibração, é igual a $\pm 0,03\%$ (em relação à amplitude da faixa de indicação do instrumento), com fator de abrangência $k = 2$, para uma probabilidade de abrangência de 95,45%, e rastreabilidade a um padrão de referência certificado pelo INMETRO. O certificado de calibração, número: ABSI Nº 32163/05, foi emitido pelo Laboratório de Pressão da empresa ABSI INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA, pertencente à Rede Brasileira de Calibração (RBC), que é constituída por laboratórios credenciados pelo INMETRO.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

Primeiramente, são apresentados os resultados referentes à calibração do manovacuômetro desenvolvido pelo NEPEB. Logo em seguida, mostram-se os modelos propostos e os resultados obtidos por meio deles para a incerteza da medição do protótipo.

A calibração e o cálculo da incerteza foram, inicialmente, implementados para o primeiro conjunto de dados coletados, levantados em abril de 2007. Para este caso, a apresentação dos resultados é feita de forma mais detalhada, com o objetivo de ilustrar a aplicação da metodologia adotada. Em seguida, de forma um pouco mais sucinta, são apresentados os resultados obtidos para o segundo conjunto de dados, coletados em outubro de 2007.

4.1 Resultados Obtidos para o Primeiro Conjunto de Dados Levantados (Abril de 2007)

4.1.1 Curvas de calibração obtidas para o protótipo pelo método dos mínimos quadrados ponderado

4.1.1.1 Cálculo de parâmetros e incertezas do modelo

Nas figuras 4.1 e 4.2, são apresentadas as curvas médias de calibração referentes à média ($n = 4$) dos pontos de calibração, obtidos durante aplicação dos valores de referência de pressão crescente (subida) e decrescente (descida) aos dois sensores do manovacuômetro desenvolvido.

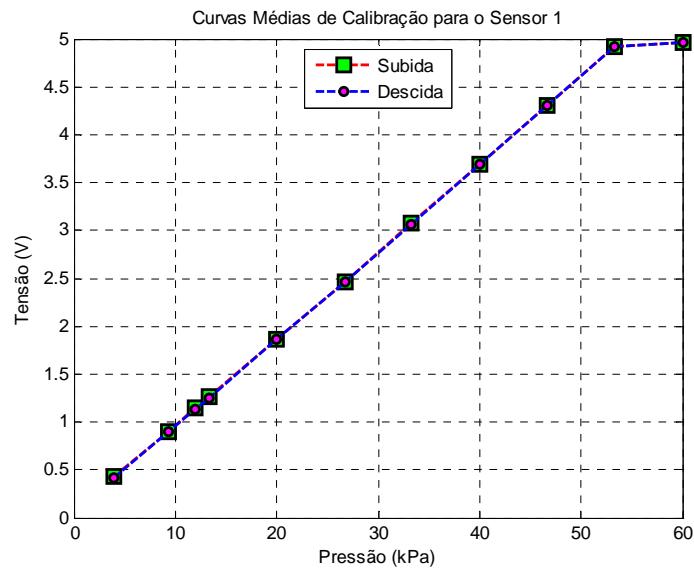


Figura 4.1: Curvas médias de calibração (subida e descida) para o sensor 1.

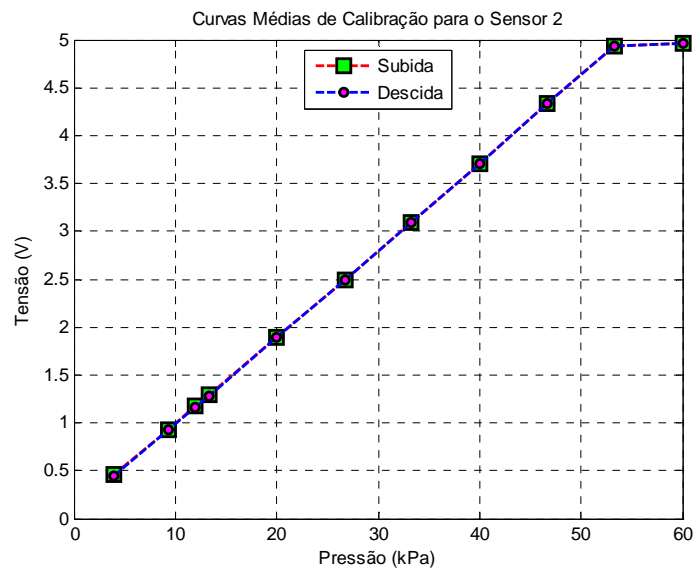


Figura 4.2: Curvas médias de calibração (subida e descida) para o sensor 2.

Pela análise de ambas as figuras acima, vê-se que as curvas são lineares para valores de pressão até 53,3 kPa. Portanto, para implementação do ajuste linear, somente essa região da curva foi considerada, que envolve $J = 10$ pontos de calibração*.

Conforme discutido anteriormente, o modelo proposto para o ajuste linear é aquele descrito pela equação (2.5). Portanto, se a é a inclinação da curva e b é o seu intercepto, para um

* Essa é justamente a quantidade de pontos a serem calibrados, segundo as recomendações de INMETRO (2008), para o caso mais extremo considerado neste documento.

determinado valor de pressão aplicado ao sensor, um valor para a tensão de saída igual a V_m corresponde a uma pressão lida pelo medidor igual a P_{rc} , ou seja:

$$P_{rc} = b + aV_m. \quad (4.1)$$

Na tabelas 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4, encontram-se os pontos de calibração levantados para as curvas de subida e descida com suas respectivas incertezas: P_r é pressão de referência aplicada, lida no instrumento de referência e associada a V_m ; a incerteza u_{Pr} foi calculada a partir do valor da incerteza padrão expandida declarado no certificado de calibração e da incerteza associada à resolução de leitura, igual a 0,1 kPa, do equipamento, ou seja,

$$u_{Pr} = \sqrt{\left(\frac{0,03\%}{2} \times P_r\right)^2 + 0,1^2}.$$

Por sua vez, a incerteza u_{Vm} foi estimada com base na variabilidade de medições repetidas na saída do protótipo para cada ponto médio de calibração (MATHIOULAKIS e BELESSIOTIS, 2000), correspondente, portanto, à incerteza do Tipo A ou desvio padrão da média u_V :

$$u_{Vm} = u_V = \frac{\sigma_V}{\sqrt{n}}, \quad (4.2)$$

Nesta expressão, ainda, σ_V corresponde ao desvio padrão dos valores de tensão coletados na saída do medidor em cada uma das quatro curvas de subida (ou descida).

Tabela 4.1: Pressão de referência, tensão lida na saída do medidor e incertezas associadas (sensor 1 – curva de subida).

| P_r (kPa) | u_{Pr} (kPa) | V_m (V) | u_{Vm} (V) |
|----------------|-------------------|--------------|-----------------|
| 4,0 | 0,1 | 0,4280 | 0,0023 |
| 9,3 | 0,1 | 0,9016 | 0,0025 |
| 12,0 | 0,1 | 1,1472 | 0,0031 |
| 13,3 | 0,1 | 1,2621 | 0,0026 |
| 20,0 | 0,1 | 1,8636 | 0,0031 |
| 26,7 | 0,1 | 2,4681 | 0,0036 |
| 33,3 | 0,1 | 3,0737 | 0,0041 |
| 40,0 | 0,1 | 3,6915 | 0,0042 |
| 46,7 | 0,1 | 4,3099 | 0,0008 |
| 53,3 | 0,1 | 4,9223 | 0,0049 |

Tabela 4.2: Pressão de referência, tensão lida na saída do medidor e incertezas associadas (sensor 1 – curva de descida).

| P_r (kPa) | u_{P_r} (kPa) | V_m (V) | u_{V_m} (V) |
|----------------|--------------------|--------------|------------------|
| 4,0 | 0,1 | 0,4234 | 0,0008 |
| 9,3 | 0,1 | 0,8968 | 0,0020 |
| 12,0 | 0,1 | 1,1392 | 0,0015 |
| 13,3 | 0,1 | 1,2532 | 0,0033 |
| 20,0 | 0,1 | 1,8596 | 0,0007 |
| 26,7 | 0,1 | 2,4649 | 0,0015 |
| 33,3 | 0,1 | 3,0701 | 0,0031 |
| 40,0 | 0,1 | 3,6866 | 0,0037 |
| 46,7 | 0,1 | 4,3045 | 0,0026 |
| 53,3 | 0,1 | 4,9166 | 0,0010 |

Tabela 4.3: Pressão de referência, tensão lida na saída do medidor e incertezas associadas (sensor 2 – curva de subida).

| P_r (kPa) | u_{P_r} (kPa) | V_m (V) | u_{V_m} (V) |
|----------------|--------------------|--------------|------------------|
| 4,0 | 0,1 | 0,4578 | 0,0024 |
| 9,3 | 0,1 | 0,9257 | 0,0066 |
| 12,0 | 0,1 | 1,1753 | 0,0022 |
| 13,3 | 0,1 | 1,2909 | 0,0036 |
| 20,0 | 0,1 | 1,8904 | 0,0035 |
| 26,7 | 0,1 | 2,4955 | 0,0050 |
| 33,3 | 0,1 | 3,0974 | 0,0047 |
| 40,0 | 0,1 | 3,7094 | 0,0045 |
| 46,7 | 0,1 | 4,3333 | 0,0034 |
| 53,3 | 0,1 | 4,9410 | 0,0050 |

Tabela 4.4: Pressão de referência, tensão lida na saída do medidor e incertezas associadas (sensor 2 – curva de descida).

| P_r (kPa) | u_{P_r} (kPa) | V_m (V) | u_{V_m} (V) |
|----------------|--------------------|--------------|------------------|
| 4,0 | 0,1 | 0,4522 | 0,0020 |
| 9,3 | 0,1 | 0,9234 | 0,0010 |
| 12,0 | 0,1 | 1,1675 | 0,0012 |
| 13,3 | 0,1 | 1,2853 | 0,0008 |
| 20,0 | 0,1 | 1,8871 | 0,0011 |
| 26,7 | 0,1 | 2,4886 | 0,0018 |
| 33,3 | 0,1 | 3,0937 | 0,0028 |
| 40,0 | 0,1 | 3,7080 | 0,0018 |
| 46,7 | 0,1 | 4,3301 | 0,0001 |
| 53,3 | 0,1 | 4,9361 | 0,0015 |

Para implementação do ajuste linear para as quatro curvas, foi usado, então, o método dos mínimos quadrados ponderado. Conforme já discutido, esse método permite o cálculo dos parâmetros a e b , das incertezas e das covariâncias associadas a esses parâmetros. Utilizando-se os dados das tabelas 4.1 a 4.4 e a equação (2.8), obtém-se o ajuste linear para cada curva média, cujos valores para os parâmetros e respectivas incertezas estão apresentados na Tabela 4.5. Nota-se que nela estão contidos, ainda, os valores calculados para as covariâncias $Cov(a,b)$ entre esse dois parâmetros. Resultados obtidos por meio desse tipo de ajuste linear também se encontram apresentados em FERREIRA *et al.*, (2008) – vide Anexo C.

Tabela 4.5: Parâmetros a e b , suas incertezas associadas u_a e u_b e covariância $Cov(a,b)$.

| | Sensor 1 | | Sensor 2 | |
|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | Subida | Descida | Subida | Descida |
| a (kPa/V) | 10,9756 | 10,9702 | 10,9994 | 10,9913 |
| u_a (kPa/V) | 0,0230 | 0,0221 | 0,0238 | 0,0219 |
| b (kPa) | -0,5570 | -0,4865 | -0,8903 | -0,8190 |
| u_b (kPa) | 0,0638 | 0,0619 | 0,0668 | 0,0621 |
| $Cov(a,b)$ (kPa/V) | $-1,25 \times 10^{-3}$ | $-1,16 \times 10^{-3}$ | $-1,36 \times 10^{-3}$ | $-1,16 \times 10^{-3}$ |

4.1.1.2 Análise de consistência do modelo

De acordo com LIRA (2002), após ter-se realizado o ajuste linear pelo método dos mínimos quadrados ponderado, é importante verificar se os valores ajustados são consistentes com os dados experimentais. COX e HARRIS (2006) salientam que tendo sido feito o ajuste pelo modelo, um teste qui-quadrado aplicado aos valores estimados dos parâmetros do modelo usando os mínimos quadrados pode ser empregado para se avaliar a consistência entre o modelo e dos dados. Se o teste falhar, tal fato indica que um ou mais dados experimentais são discrepantes. “O teste qui-quadrado descreve quão bem o modelo realmente se ajusta aos dados comparativamente a quão bem era esperado que ele estivesse ajustado” (COX e HARRIS, 2006, p. 539).

LIRA (2000) afirma que o valor mínimo da função qui-quadrada χ^2 , representada por (2.6), denotado por χ_{\min}^2 , segue, aproximadamente uma distribuição qui-quadrada com $\nu = n - m$ graus de liberdade. Dessa forma, espera-se que o valor de χ_{\min}^2 esteja próximo a $n - m$ ou, de modo equivalente, a chamada *razão de Birge*,

$$Bi = \left(\frac{\chi_{\min}^2}{n - m} \right)^{1/2}, \quad (4.3)$$

deve ser aproximadamente igual a 1.

“Naturalmente, se esse fato ocorrer, isso não pode ser tomado como prova de que o modelo seja correto. Todavia, se o valor da razão de Birge for significativamente diferente da unidade, tal indica que alguma coisa está errada” (LIRA, 2002, p. 144). Para a hipótese de $Bi < 1$, esse fato sugere que χ^2 é ‘muito pequeno’, significando que as incertezas das grandezas de entrada do modelo são maiores que o razoável. Por outro lado $Bi > 1$ é um sinal da possível presença resultados discrepantes (*outliers*) nas medições ou que a incerteza das grandezas de entrada do modelo são menores que o razoável (LIRA, 2000).

Os valores calculados de Bi (com $n = J = 10$) para as curvas de ajuste obtidas para os sensores 1 e 2, referentes aos dados obtidos em abril/2007, estão próximos de 1 (Tabela 4.6).

Tabela 4.6: Razão de Birge para as curvas dos sensores 1 e 2, referentes aos dados de abr/2007.

| Razão de Birge | Sensor 1 | | Sensor 2 | |
|----------------|----------|---------|----------|---------|
| | Subida | Descida | Subida | Descida |
| <i>Bi</i> | 1,0755 | 1,0716 | 1,0412 | 1,0869 |

Tais resultados indicam que inexistem não-conformidade entre os dados e o modelo.

4.1.2 Cálculo da incerteza de medição para o manovacuômetro desenvolvido

Com a finalidade de exemplificar os cálculos efetuados para determinação da incerteza de medição, foi tomado um ponto de calibração arbitrário, escolhido da curva média de calibração do sensor 2, subida, cuja pressão aplicada é igual a 26,7 kPa. (Tabela 4.3). Para este ponto, a tensão de saída é $V_m = 2,4955$ V e o desvio padrão ($n = 4$) é igual a 0,0100 V.

4.1.2.1 Avaliação da incerteza utilizando-se a expressão fornecida no datasheet do sensor

A construção do primeiro modelo para avaliação da incerteza da medição do manovacuômetro desenvolvido pelo NEPEB foi baseada na expressão encontrada no *datasheet* do sensor (FREESCALE, 2004). Ela relaciona a tensão medida na saída do sensor com a pressão aplicada em sua entrada e foi utilizada como ponto de partida para se determinar a relação funcional f do modelo, descrita por (2.20):

$$V_S = V_F(P \times 0,018 + 0,04); \quad (4.4)$$

V_S representa a amplitude do sinal de saída do sensor; V_F é a tensão de alimentação; e P é a pressão aplicada ao sensor.

Como a grandeza a ser avaliada como resultado da medição do manovacuômetro digital é a pressão P medida pelo equipamento, a equação (4.4) deve ser manipulada, isolando-se, assim, o mensurando, obtendo-se:

$$P = \frac{500(V_S - 0,04V_F)}{9V_F}. \quad (4.5)$$

Portanto, (4.5) permite que seja calculada a pressão medida pelo protótipo, de acordo com o valor de tensão aplicado em sua entrada. À expressão acima, inclui-se, ainda, a incerteza ΔP , referente ao manovacuômetro de referência utilizado, conforme sugerido no GUM (ABNT e INMETRO, 2003), o que resulta, finalmente, na relação funcional f procurada:

$$P = \frac{500(V_S - 0,04V_F)}{9V_F} + \Delta P . \quad (4.6)$$

A avaliação da incerteza do Tipo A é calculada utilizando-se a equação (2.13) ou, então, conforme (4.2),

$$u_V = \frac{\sigma_V}{\sqrt{n}} = \frac{0,0100}{\sqrt{4}} = 0,0050V .$$

Para estimativa da incerteza do Tipo B foram observados os seguintes componentes de incerteza: (i) exatidão do valor lido da tensão – u_E , relacionada a grandezas de influência como temperatura, linearidade e à própria pressão, conforme informado no *datasheet* (aqui, utilizou-se o valor associado a 2,5 vezes V_{FFS} , que corresponde ao valor máximo atribuído a essa contribuição, segundo o fabricante, para a faixa de variação de temperatura entre 0 e 85°C); (ii) estabilidade de *offset* (deriva) – u_D (relacionada a 0,5 vezes V_{FFS}); (iii) variabilidade da fonte de alimentação – u_{FA} (foi considerada, neste caso, a fonte de alimentação do computador que foi usada para alimentar o sensor e cuja variabilidade média estimada é de 0,1 V). Um outro fator de variabilidade relevado aqui para o cálculo da incerteza do tipo B é aquele ligado à resolução de leitura do instrumento, que no caso do protótipo é de 0,0001 V, mencionado aqui como u_R . As distribuições de probabilidade para os fatores (i), (iii) e aquela relacionada a u_R foram consideradas como sendo uniformes; portanto:

$$u_E = \frac{0,1125}{\sqrt{3}} = 0,0650V ,$$

$$u_{FA} = \frac{0,1}{\sqrt{3}} = 0,0577V ,$$

$$u_R = \frac{0,0001}{\sqrt{3}} = 0,00006V .$$

O valor de u_D foi inferido como sendo igual a 0,0225 V, conforme indicado na Tabela 3.1. Outro componente relevado para a estimativa da incerteza do tipo B foi aquele associado ao instrumento de referência:

$$u_{Pr} = \sqrt{\left(\frac{0,03\%}{2} \times 26,7\right)^2 + 0,1^2} = 0,1kPa .$$

Tomando-se as derivadas parciais de (4.6) pelas *grandezas de entrada* (assumindo-se independência estatística, ou seja, não-correlação entre elas) ou aplicando-se a lei de propagação da incerteza descrita por 2.23, encontra-se a incerteza padrão combinada como:

$$u_{cl}^2(P) = \left(\frac{\partial P}{\partial V_S}\right)^2 u_S^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial V_F}\right)^2 u_F^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial \Delta P}\right)^2 u_{\Delta P}^2. \quad (4.7)$$

onde:

$$u_S^2 = u_V^2 + u_E^2 + u_R^2 \Rightarrow u_S = 0,0652V, \quad u_F^2 = u_{FA}^2 + u_D^2 \Rightarrow u_F = 0,0620V,$$

$$u_{\Delta P} = u_{Pr} = 0,1kPa;$$

$$\frac{\partial P}{\partial V_S} = \frac{500}{9V_F} = 11,1111 \frac{kPa}{V}, \quad \frac{\partial P}{\partial V_F} = -\frac{500V_S}{9V_F^2} = -5,546 \frac{kPa}{V} \quad \text{e} \quad \frac{\partial P}{\partial \Delta P} = 1.$$

Como estimativa dos valores das grandezas de entrada, o valor de V_F usado nos cálculos foi o valor médio da fonte de alimentação, igual a 5 V. Igualmente, o valor médio foi usado para $V_S = V_m = 2,4955$ V.

Substituindo-se os valores acima em (4.7), a incerteza padrão combinada é estimada como sendo:

$$u_{cl}(P) = 0,8kPa$$

A incerteza padrão expandida, U_{p1} , foi calculada considerando-se uma probabilidade de abrangência igual a 95,45% para a distribuição- t . A fórmula de Welch-Satterthwaite (2.25), foi utilizada para o cálculo dos graus de liberdade efetivos ν_{eff} .

Os graus de liberdade associados a u_E , u_R , u_{FA} e u_D foram considerados como $\rightarrow \infty$. Para u_{Vm} , $\nu = n - 1 = 4 - 1 = 3$, e, para u_{Pr} , o número de graus de liberdade foi estimado com sendo também $\rightarrow \infty$. Pelo uso, então, de (2.25):

$$\nu_{eff} = \frac{(0,8)^4}{\frac{(11,1111 \times 0,0050)^4}{3}} = 129046,12 \rightarrow \infty$$

Com efeito, o fator de abrangência é igual a $k_l = 2$, para o valor encontrado para ν_{eff} , e, portanto:

$$U_{p1} = k_1 \times u_{c1}(P) = 2 \times 0,8 \text{ kPa} = 1,6 \text{ kPa}$$

Resultados obtidos para o tipo de modelagem mostrado acima podem também ser encontrados em FERREIRA *et al.* (2007) – vide Anexo D.

Os valores para a incerteza padrão expandida calculada para os outros pontos da curva de subida do sensor 2 e também para os pontos de calibração das outras curvas (sensor 2 – descida, sensor 1 – subida e sensor 1 – descida) são mostrados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7: Incerteza expandida para todos os pontos de calibração – usando-se a expressão obtida do *datasheet* do sensor.

| Pressão Aplicada (kPa) | U_{p1} (kPa) | | | |
|------------------------|----------------|---------|----------|---------|
| | Sensor 1 | | Sensor 2 | |
| | Subida | Descida | Subida | Descida |
| 4,0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 |
| 9,3 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 |
| 12,0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 |
| 13,3 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 |
| 20,0 | 1,5 | 1,5 | 1,6 | 1,5 |
| 26,7 | 1,6 | 1,6 | 1,6 | 1,6 |
| 33,3 | 1,7 | 1,7 | 1,7 | 1,7 |
| 40,0 | 1,8 | 1,8 | 1,8 | 1,8 |
| 46,7 | 1,9 | 1,9 | 1,9 | 1,9 |
| 53,3 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,0 |

Observa-se que os valores calculados estão na faixa compreendida entre 1,5 e 2,0 kPa. Nas figuras de 4.3 a 4.6, nota-se que alguns dados experimentais (pontos de calibração) situam-se próximos do limite ou fora da faixa estimada para a pressão medida pelo protótipo.

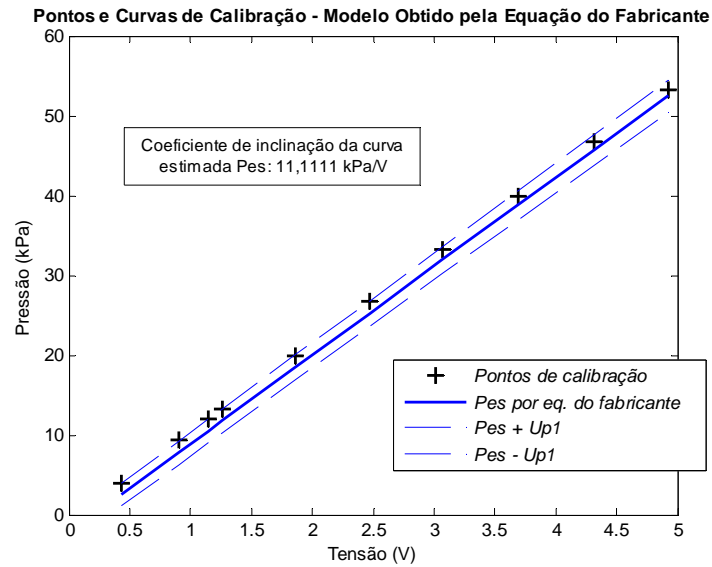


Figura 4.3: Pontos de calibração e curva estimada pelo modelo baseado na equação (eq.) fornecida pelo fabricante e incertezas associadas, para o sensor 1 (curva de subida). (+): pontos de calibração; (P_{es}): curva estimada de pressão pelo modelo, resultante de (4.5) e; ($P_{es} + U_{p1}$ e $P_{es} - U_{p1}$): curva estimada associada com a incerteza expandida.

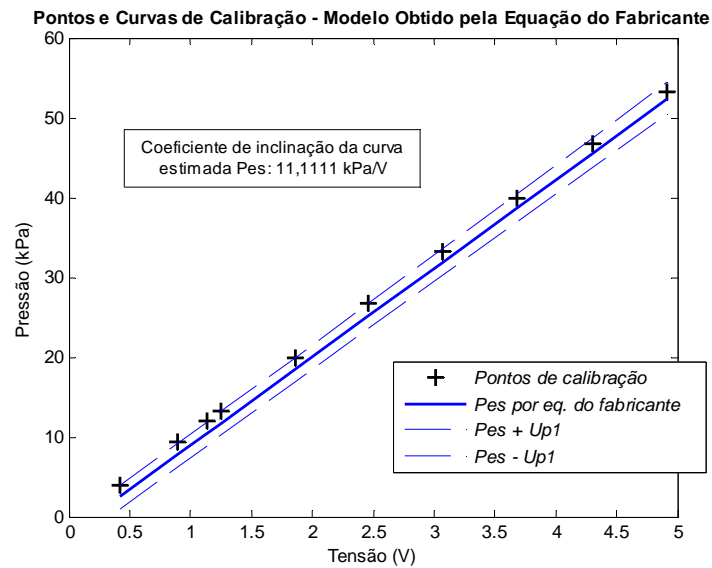


Figura 4.4: Pontos de calibração e curva estimada pelo modelo baseado na equação (eq.) fornecida pelo fabricante e incertezas associadas, para o sensor 1 (curva de descida). (+): pontos de calibração; (P_{es}): curva estimada de pressão pelo modelo, resultante de (4.5) e; ($P_{es} + U_{p1}$ e $P_{es} - U_{p1}$): curva estimada associada com a incerteza expandida.

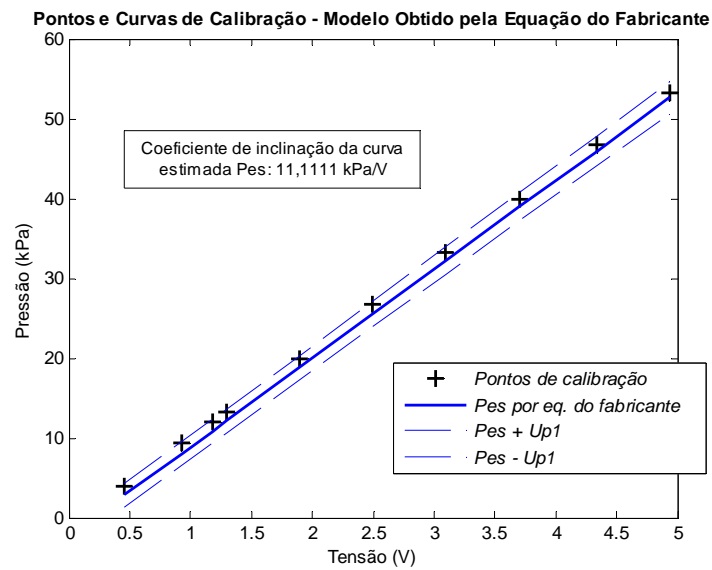


Figura 4.5: Pontos de calibração e curva estimada pelo modelo baseado na equação (eq.) fornecida pelo fabricante e incertezas associadas, para o sensor 2 (curva de subida). (+): pontos de calibração; (P_{es}): curva estimada de pressão pelo modelo, resultante de (4.5) e; ($P_{es} + U_{p1}$ e $P_{es} - U_{p1}$): curva estimada associada com a incerteza expandida.

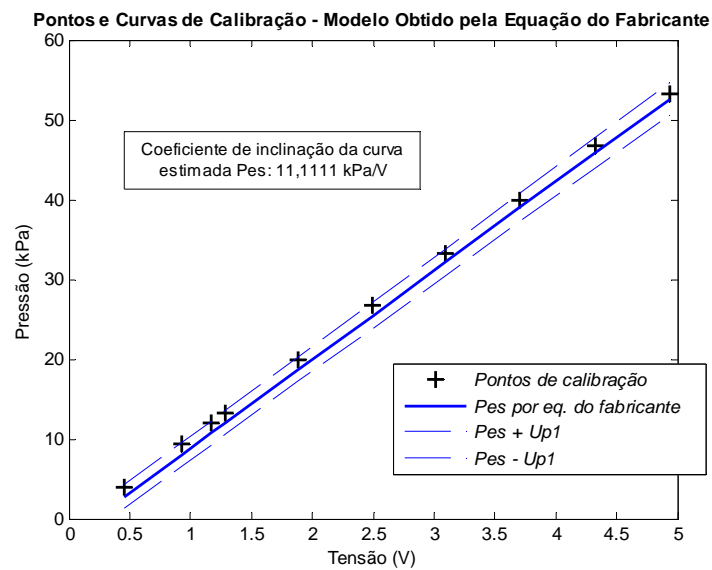


Figura 4.6: Pontos de calibração e curva estimada pelo modelo baseado na equação (eq.) fornecida pelo fabricante e incertezas associadas, para o sensor 2 (curva de descida). (+): pontos de calibração; (P_{es}): curva estimada de pressão pelo modelo, resultante de (4.5) e; ($P_{es} + U_{p1}$ e $P_{es} - U_{p1}$): curva estimada associada com a incerteza expandida.

4.1.2.2 Avaliação da incerteza utilizando-se a expressão obtida durante a calibração pelo ajuste linear empregando o método dos mínimos quadrados ponderado

O segundo modelo proposto para avaliação da incerteza do protótipo foi construído levando-se em conta a equação (4.1), obtida pelo ajuste linear baseado em mínimos quadrados ponderado, implementado durante a calibração.

O cálculo da incerteza u_{Pc} , associada aos pontos de calibração, é derivada também da aplicação da lei de propagação da incerteza (2.22) sobre (4.1), que agora leva em conta a correlação entre as grandezas dessa última equação. Observando-se que, para o caso, $N = 3$, $x_1 = V_m$, $x_2 = b$, $x_3 = a$ e a relação funcional f corresponde a P_{rc} :

$$u_{Pc}^2 = \left(\frac{\partial P_{rc}}{\partial V_m} \right)^2 u^2(V_m) + \left(\frac{\partial P_{rc}}{\partial b} \right)^2 u^2(b) + \left(\frac{\partial P_{rc}}{\partial a} \right)^2 u^2(a) + 2 \frac{\partial P_{rc}}{\partial b} \frac{\partial P_{rc}}{\partial a} u(a, b).$$

Logo, tem-se a seguinte expressão que permite o cálculo de u_{Pc} :

$$u_{Pc} = \left(a^2 u_{V_m}^2 + u_b^2 + V_m^2 u_a^2 + 2V_m Cov(a, b) \right)^{1/2}, \quad (4.8)$$

onde a incerteza u_{V_m} é estimada considerando: a incerteza Tipo A, u_V ; a exatidão do sensor, u_E , e a resolução do manovacuômetro do NEPEB, u_R :

$$u_{V_m}^2 = u_V^2 + u_E^2 + u_R^2 \Rightarrow u_{V_m} = 0,0652V$$

Tomando-se o valor acima e aqueles da terceira coluna da Tabela 4.5 e substituindo-os em (4.8), tem-se $u_{Pc} = 0,7183kPa$.

A incerteza padrão combinada, por sua vez, foi obtida de

$$u_{c2}^2(P) = u_{Pc}^2 + u_{Pr}^2, \quad (4.9)$$

onde, novamente, $u_{Pr} = 0,1 kPa$ é a incerteza associada ao instrumento de referência. Dessa forma, a incerteza padrão combinada para o segundo modelo é:

$$u_{c2}(P) = 0,7kPa.$$

Novamente, de forma similar à realizada para primeiro modelo, a incerteza padrão expandida, U_{p2} , foi estimada para uma probabilidade de abrangência igual a 95,45%, considerando-se distribuição- t ou de Student.

Como para o modelo anterior, os graus de liberdade associados a u_E , u_R foram considerados como $\rightarrow \infty$. Para u_V , $\nu = n - 1 = 4 - 1 = 3$. Quanto às incertezas u_a e u_b , de acordo com o GUM, $\nu = J - m$, onde m é o número de parâmetros do modelo, ou seja, $\nu = 10 - 2 = 8$. Finalmente, para u_{Pr} , o número de graus de liberdade foi estimado com sendo também $\rightarrow \infty$. Com efeito, utilizando-se a fórmula de Welch-Satterthwaite (2.25) para o cálculo dos graus de liberdade efetivos ν_{eff} :

$$\nu_{eff} = \frac{(0,7)^4}{\frac{(10,9994 \times 0,0050)^4}{3} + \frac{0,0668^4}{8} + \frac{(2,4955 \times 0,0238)^4}{8}} = 33845,91 \rightarrow \infty$$

Portanto, novamente $k_2 = 2$, e o valor estimado para a incerteza padrão expandida é:

$$U_{p2} = k_2 \times u_{c2}(P) = 2 \times 0,7 \text{ kPa} = 1,4 \text{ kPa}$$

Esse valor de incerteza expandida é o mesmo encontrado para a maioria dos pontos de calibração levantados para a curva de subida do sensor 2 e para as curvas de calibração remanescentes, conforme indicado na Tabela 4.8. Para alguns poucos pontos, observa-se que $U_{p2} = 1,5 \text{ kPa}$.

Tabela 4.8: Incerteza expandida para todos os pontos de calibração – usando-se a expressão obtida por meio do ajuste linear por mínimos quadrados ponderado.

| Pressão Aplicada (kPa) | U_{p2} (kPa) | | | |
|------------------------|----------------|---------|----------|---------|
| | Sensor 1 | | Sensor 2 | |
| | Subida | Descida | Subida | Descida |
| 4,0 | 1,4 | 1,4 | 1,4 | 1,4 |
| 9,3 | 1,4 | 1,4 | 1,5 | 1,4 |
| 12,0 | 1,4 | 1,4 | 1,4 | 1,4 |
| 13,3 | 1,4 | 1,4 | 1,4 | 1,4 |
| 20,0 | 1,4 | 1,4 | 1,4 | 1,4 |
| 26,7 | 1,4 | 1,4 | 1,4 | 1,4 |
| 33,3 | 1,4 | 1,4 | 1,4 | 1,4 |
| 40,0 | 1,4 | 1,4 | 1,5 | 1,4 |
| 46,7 | 1,4 | 1,4 | 1,5 | 1,4 |
| 53,3 | 1,5 | 1,4 | 1,5 | 1,4 |

Nas figuras de 4.7 a 4.10, pode ser notado que todos os pontos experimentais encontram-se dentro e próximos à região central da faixa abrangida pelos valores estimados para a pressão e as incertezas associadas, diferentemente do observado nas figuras de 4.3 a 4.6.

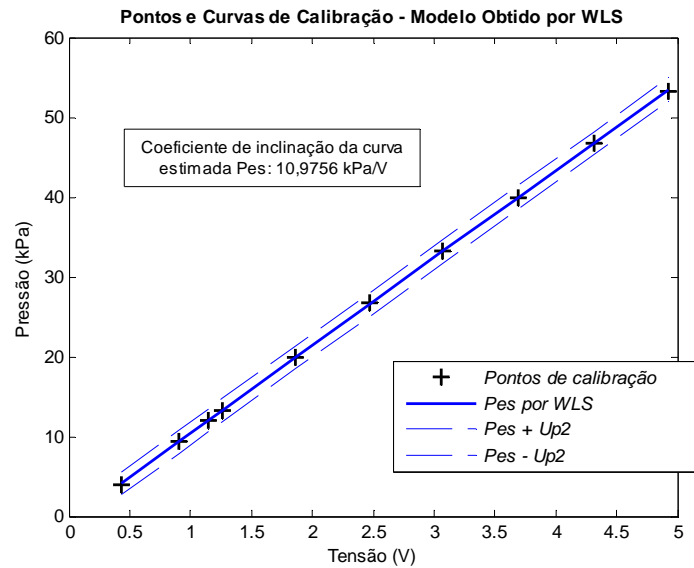


Figura 4.7: Pontos de calibração e curva estimada pelo modelo baseado nos mínimos quadrados ponderado (WLS) e incertezas associadas, para o sensor 1 (curva de subida). (+): pontos de calibração; (P_{es}): curva estimada de pressão pelo modelo resultante do ajuste linear e; ($P_{es} + U_{p2}$ e $P_{es} - U_{p2}$): curva estimada associada com a incerteza expandida.

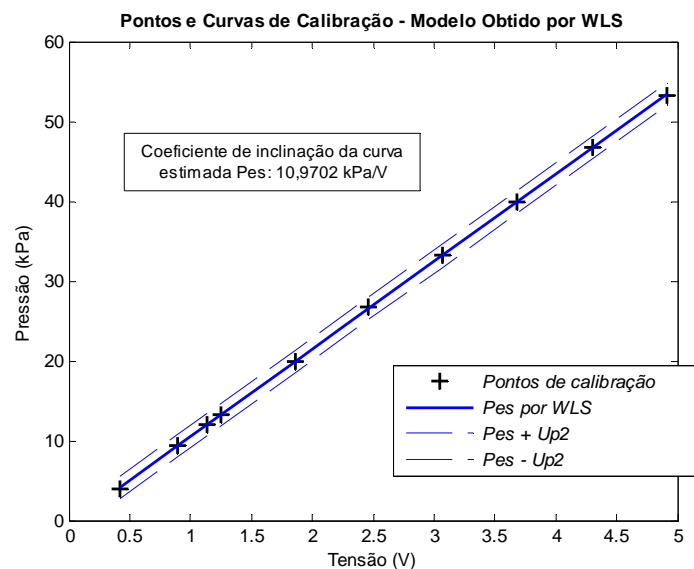


Figura 4.8: Pontos de calibração e curva estimada pelo modelo baseado nos mínimos quadrados ponderado (WLS) e incertezas associadas, para o sensor 1 (curva de descida). (+): pontos de calibração; (P_{es}): curva estimada de pressão pelo modelo resultante do ajuste linear e; ($P_{es} + U_{p2}$ e $P_{es} - U_{p2}$): curva estimada associada com a incerteza expandida.

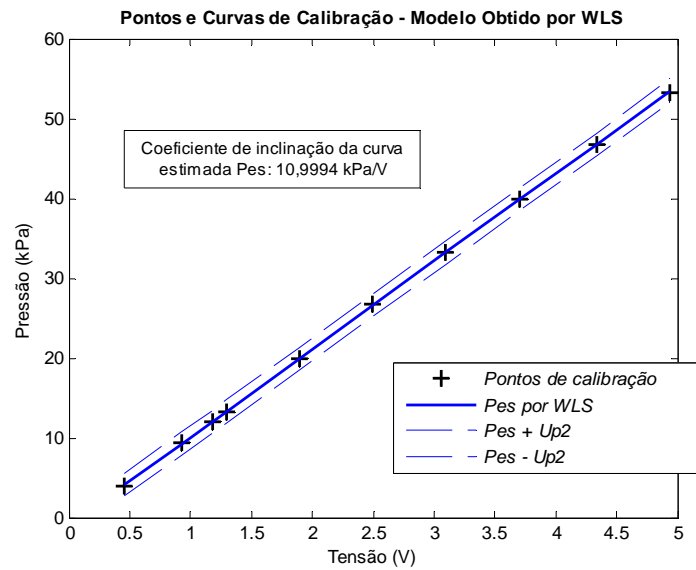


Figura 4.9: Pontos de calibração e curva estimada pelo modelo baseado nos mínimos quadrados ponderado (WLS) e incertezas associadas, para o sensor 2 (curva de subida). (+): pontos de calibração; (P_{es}): curva estimada de pressão pelo modelo resultante do ajuste linear e; ($P_{es} + U_{p2}$ e $P_{es} - U_{p2}$): curva estimada associada com a incerteza expandida.

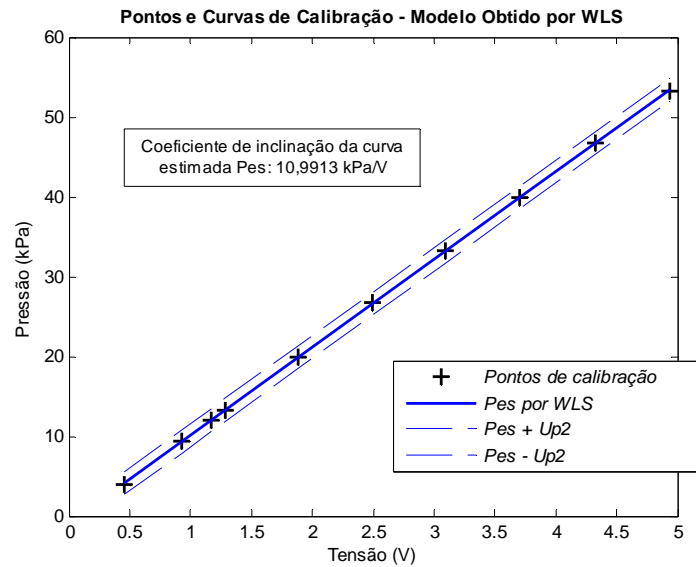


Figura 4.10: Pontos de calibração e curva estimada pelo modelo baseado nos mínimos quadrados ponderado (WLS) e incertezas associadas, para o sensor 2 (curva de descida). (+): pontos de calibração; (P_{es}): curva estimada de pressão pelo modelo resultante do ajuste linear e; ($P_{es} + U_{p2}$ e $P_{es} - U_{p2}$): curva estimada associada com a incerteza expandida.

4.2 Resultados Obtidos para o Segundo Conjunto de Dados Levantados (Outubro de 2007)

4.2.1 Curvas de calibração obtidas para o protótipo pelo método dos mínimos quadrados ponderado

4.2.1.1 Cálculo de parâmetros e incertezas do modelo

De modo similar ao realizado para o conjunto de dados coletados em abril de 2007, procedeu-se à calibração do protótipo utilizando-se o método dos mínimos quadrados ponderado (WLS). Com efeito, o modelo de ajuste construído é semelhante ao descrito pela equação (4.1) e o cálculo dos parâmetros, de suas incertezas e da covariância associada foram obtidos por intermédio de (2.8).

Para o levantamento dos pontos de calibração deste outro grupo de dados, o valor de pressão 60,0 kPa não foi aplicado aos sensores. Isso se deveu à avaliação realizada durante o traçado das curvas médias de calibração para o primeiro conjunto de dados em que foi acusada a presença dos pontos correspondentes a esse valor de pressão em região de não-linearidade. Por conseguinte, novamente a faixa de pontos considerada para implementação da calibração ficou limitada ao valor pressão de 53,3 kPa.

Nas tabelas de 4.9 até 4.12, são mostrados os novos pontos de calibração levantados para as curvas de subida e descida dos sensores 1 e 2 com suas respectivas incertezas. De modo igual ao apresentado anteriormente, P_r é pressão de referência aplicada, lida no manovacuômetro de referência e associada à estimativa da pressão lida na saída dos sensores, V_m ; e u_{Pr} corresponde à incerteza relacionada ao instrumento de referência.

Tabela 4.9: Pressão de referência, tensão lida na saída do medidor e incertezas associadas (sensor 1 – curva de subida).

| P_r (kPa) | u_{P_r} (kPa) | V_m (V) | u_{V_m} (V) |
|----------------|--------------------|--------------|------------------|
| 4,0 | 0,1 | 0,4374 | 0,0128 |
| 9,3 | 0,1 | 0,9084 | 0,0126 |
| 12,0 | 0,1 | 1,1494 | 0,0141 |
| 13,3 | 0,1 | 1,2699 | 0,0131 |
| 20,0 | 0,1 | 1,8712 | 0,0132 |
| 26,7 | 0,1 | 2,4752 | 0,0110 |
| 33,3 | 0,1 | 3,0804 | 0,0131 |
| 40,0 | 0,1 | 3,6946 | 0,0118 |
| 46,7 | 0,1 | 4,3167 | 0,0116 |
| 53,3 | 0,1 | 4,9294 | 0,0161 |

Tabela 4.10: Pressão de referência, tensão lida na saída do medidor e incertezas associadas (sensor 1 – curva de descida).

| P_r (kPa) | u_{P_r} (kPa) | V_m (V) | u_{V_m} (V) |
|----------------|--------------------|--------------|------------------|
| 4,0 | 0,1 | 0,4513 | 0,0097 |
| 9,3 | 0,1 | 0,9236 | 0,0093 |
| 12,0 | 0,1 | 1,1655 | 0,0098 |
| 13,3 | 0,1 | 1,2809 | 0,0102 |
| 20,0 | 0,1 | 1,8820 | 0,0094 |
| 26,7 | 0,1 | 2,4853 | 0,0109 |
| 33,3 | 0,1 | 3,0976 | 0,0102 |
| 40,0 | 0,1 | 3,7124 | 0,0104 |
| 46,7 | 0,1 | 4,3226 | 0,0088 |
| 53,3 | 0,1 | 4,9324 | 0,0135 |

Tabela 4.11: Pressão de referência, tensão lida na saída do medidor e incertezas associadas (sensor 2 – curva de subida).

| P_r (kPa) | u_{P_r} (kPa) | V_m (V) | u_{V_m} (V) |
|----------------|--------------------|--------------|------------------|
| 4,0 | 0,1 | 0,4119 | 0,0127 |
| 9,3 | 0,1 | 0,8841 | 0,0126 |
| 12,0 | 0,1 | 1,1269 | 0,0123 |
| 13,3 | 0,1 | 1,2466 | 0,0124 |
| 20,0 | 0,1 | 1,8500 | 0,0128 |
| 26,7 | 0,1 | 2,4529 | 0,0116 |
| 33,3 | 0,1 | 3,0609 | 0,0106 |
| 40,0 | 0,1 | 3,6823 | 0,0126 |
| 46,7 | 0,1 | 4,3026 | 0,0165 |
| 53,3 | 0,1 | 4,9105 | 0,0138 |

Tabela 4.12: Pressão de referência, tensão lida na saída do medidor e incertezas associadas (sensor 2 – curva de descida).

| P_r (kPa) | u_{P_r} (kPa) | V_m (V) | u_{V_m} (V) |
|----------------|--------------------|--------------|------------------|
| 4,0 | 0,1 | 0,4249 | 0,0089 |
| 9,3 | 0,1 | 0,8998 | 0,0099 |
| 12,0 | 0,1 | 1,1401 | 0,0090 |
| 13,3 | 0,1 | 1,2574 | 0,0103 |
| 20,0 | 0,1 | 1,8583 | 0,0103 |
| 26,7 | 0,1 | 2,4673 | 0,0093 |
| 33,3 | 0,1 | 3,0678 | 0,0101 |
| 40,0 | 0,1 | 3,6887 | 0,0125 |
| 46,7 | 0,1 | 4,3104 | 0,0102 |
| 53,3 | 0,1 | 4,9245 | 0,0161 |

Os valores dos parâmetros, as respectivas incertezas e a covariância, obtidos através do ajuste linear para os pontos do segundo conjunto de dados, estão apresentados na Tabela 4.13.

Tabela 4.13: Parâmetros a e b , suas incertezas associadas u_a e u_b e covariância $Cov(a,b)$.

| | Sensor 1 | | Sensor 2 | |
|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | <i>Subida</i> | <i>Descida</i> | <i>Subida</i> | <i>Descida</i> |
| a (kPa/V) | 10,9820 | 10,9991 | 10,9561 | 10,9746 |
| u_a (kPa/V) | 0,0385 | 0,0331 | 0,0384 | 0,0347 |
| b (kPa) | -0,6349 | -0,8145 | -0,3471 | -0,5133 |
| u_b (kPa) | 0,1074 | 0,0909 | 0,1042 | 0,0903 |
| $Cov(a,b)$ (kPa/V) | $-3,56 \times 10^{-3}$ | $-2,57 \times 10^{-3}$ | $-3,42 \times 10^{-3}$ | $-2,65 \times 10^{-3}$ |

4.2.1.2 Análise de consistência do modelo

Na Tabela 4.14, podem ser observados os valores calculados para a razão de Birge por meio de (4.3) para os modelos ajustados das curvas de subida e descida dos sensores 1 e 2, com referência aos dados obtidos em outubro/2007.

Tabela 4.14: Razão de Birge para as curvas dos sensores 1 e 2 referentes aos dados de out/2007.

| Razão de Birge | Sensor 1 | | Sensor 2 | |
|----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|
| | Subida | Descida | Subida | Descida |
| Bi | 0,6949 | 0,6927 | 0,6877 | 0,8294 |

Analisando-se os resultados acima, vê-se que os valores para Bi estão próximos da unidade, e, portanto, mais uma vez, os dados e o modelo apresentam conformidade entre si (WEISE e WÖGER, 2000).

4.2.2 Cálculo da incerteza de medição manovacuômetro do desenvolvido

Utilizando-se a mesma metodologia aplicada para o primeiro conjunto de dados, tanto o modelo utilizando a equação fornecida pelo fabricante do sensor em seu *datasheet* quanto o modelo baseado na expressão obtida pela calibração do manovacuômetro foram construídos novamente para o novo grupo de dados. Os resultados obtidos por ambos os modelos estão apresentados, a seguir.

4.2.2.1 Avaliação da incerteza utilizando-se a expressão fornecida no datasheet do sensor

Na Tabela 4.15, encontram-se os valores estimados para a incerteza padrão expandida dos pontos das quatro curvas levantadas, sensor 1, subida e descida e sensor 2, subida e descida, utilizando-se o modelo baseado na equação apresentada no *datasheet* do sensor.

Tabela 4.15: Incerteza expandida para todos os pontos de calibração – usando-se a expressão obtida do *datasheet* do sensor.

| Pressão Aplicada (kPa) | U_{pl} (kPa) | | | |
|------------------------|----------------|---------|----------|---------|
| | Sensor 1 | | Sensor 2 | |
| | Subida | Descida | Subida | Descida |
| 4,0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 |
| 9,3 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 |
| 12,0 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 |
| 13,3 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 |
| 20,0 | 1,6 | 1,6 | 1,6 | 1,6 |
| 26,7 | 1,6 | 1,6 | 1,6 | 1,6 |
| 33,3 | 1,7 | 1,7 | 1,7 | 1,7 |
| 40,0 | 1,8 | 1,8 | 1,8 | 1,8 |
| 46,7 | 1,9 | 1,9 | 1,9 | 1,9 |
| 53,3 | 2,0 | 2,0 | 2,0 | 2,0 |

Percebe-se que os valores calculados para a incerteza expandida variam entre 1,5 e 2,0 kPa. Igualmente como o ocorrido para o primeiro conjunto de dados, alguns dados experimentais (pontos de calibração) situam-se próximos do limite ou fora da faixa estimada para a pressão medida pelo protótipo, considerando-se o modelo em estudo (figuras de 4.11 até 4.14).

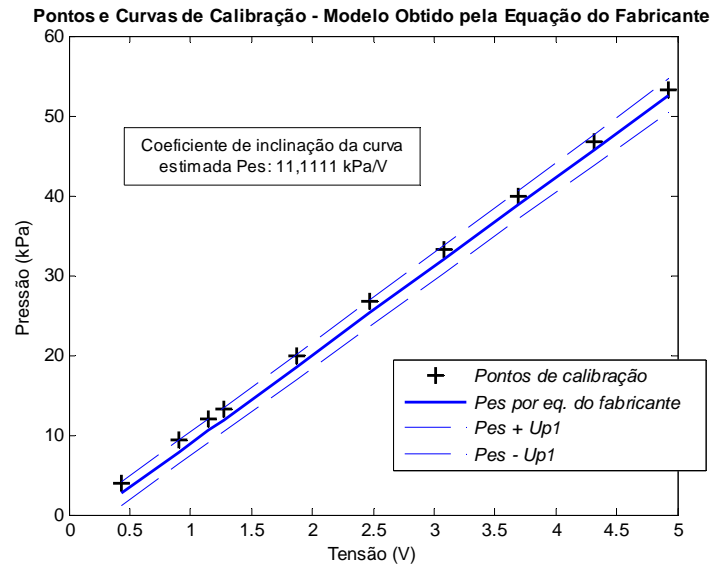


Figura 4.11: Pontos de calibração e curva estimada pelo modelo baseado na equação (eq.) fornecida pelo fabricante e incertezas associadas, para o sensor 1 (curva de subida). (+): pontos de calibração; (P_{es}): curva estimada de pressão pelo modelo, resultante de (4.5) e; ($P_{es} + U_{p1}$ e $P_{es} - U_{p1}$): curva estimada associada com a incerteza expandida.

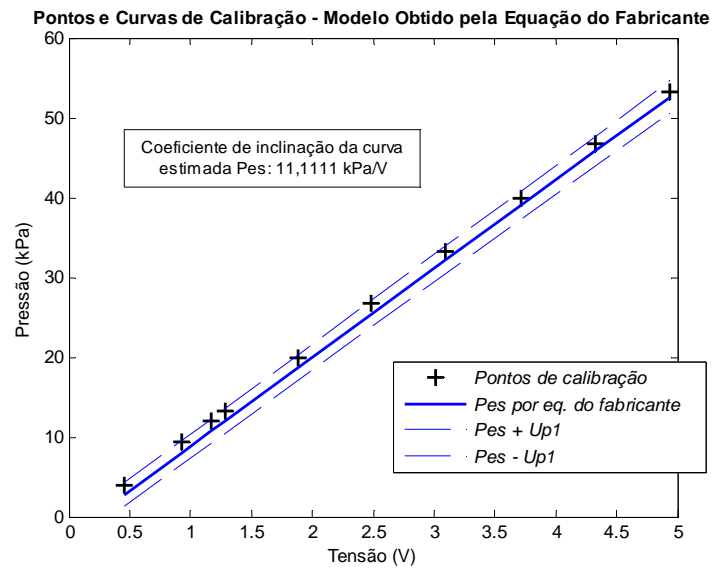


Figura 4.12: Pontos de calibração e curva estimada pelo modelo baseado na equação (eq.) fornecida pelo fabricante e incertezas associadas, para o sensor 1 (curva de descida). (+): pontos de calibração; (P_{es}): curva estimada de pressão pelo modelo, resultante de (4.5) e; ($P_{es} + U_{p1}$ e $P_{es} - U_{p1}$): curva estimada associada com a incerteza expandida.

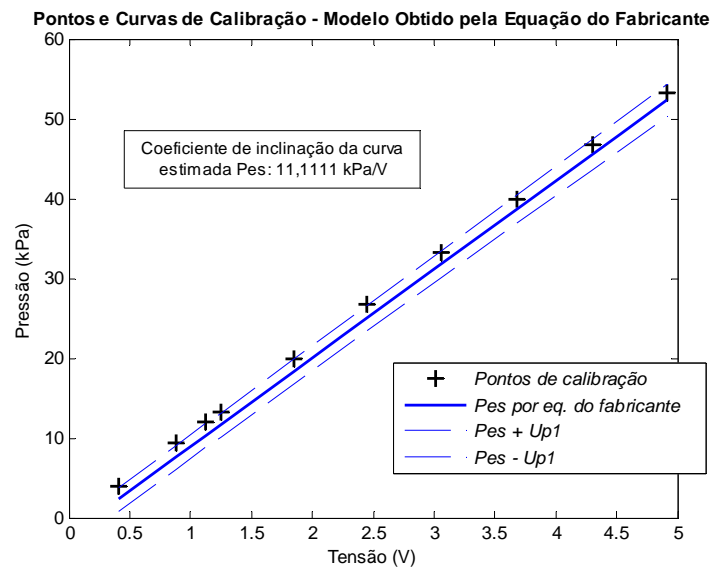


Figura 4.13: Pontos de calibração e curva estimada pelo modelo baseado na equação (eq.) fornecida pelo fabricante e incertezas associadas, para o sensor 2 (curva de subida). (+): pontos de calibração; (P_{es}): curva estimada de pressão pelo modelo, resultante de (4.5) e; ($P_{es} + U_{p1}$ e $P_{es} - U_{p1}$): curva estimada associada com a incerteza expandida.

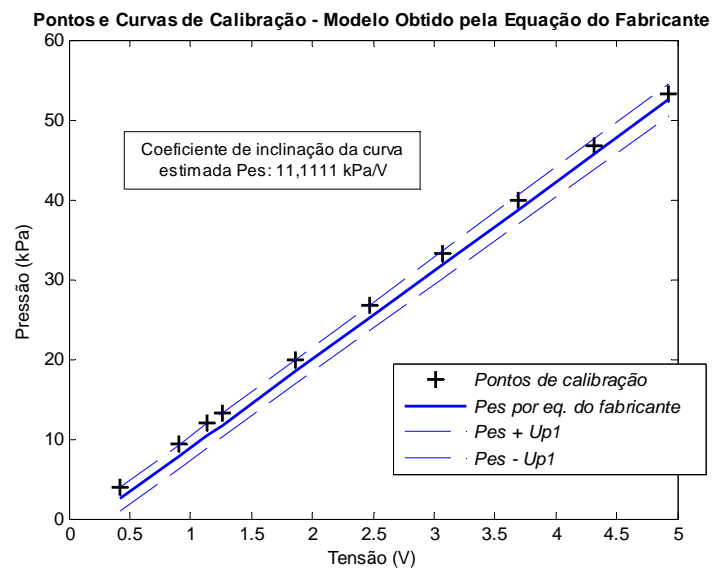


Figura 4.14: Pontos de calibração e curva estimada pelo modelo baseado na equação (eq.) fornecida pelo fabricante e incertezas associadas, para o sensor 2 (curva de descida). (+): pontos de calibração; (P_{es}): curva estimada de pressão pelo modelo, resultante de (4.5) e; ($P_{es} + U_{p1}$ e $P_{es} - U_{p1}$): curva estimada associada com a incerteza expandida.

4.2.2.2 Avaliação da incerteza utilizando-se a expressão obtida durante a calibração pelo ajuste linear empregando o método dos mínimos quadrados ponderado

O valor obtido para a incerteza expandida pelo método dos mínimos quadrados ponderado é similar para todos os pontos de calibração das curvas de subida e descida de ambos os sensores, igual a 1,5 kPa.

Nas figuras de 4.15 a 4.18, pode ser observado o mesmo comportamento verificado para o grupo de dados levantados em abril de 2007: todos os pontos experimentais localizam-se, mais uma vez, inseridos, proximamente à região central, na faixa abrangida pelos valores estimados para a pressão e as incertezas associadas, quando a estimação é feita pelo método dos mínimos quadrados ponderado.

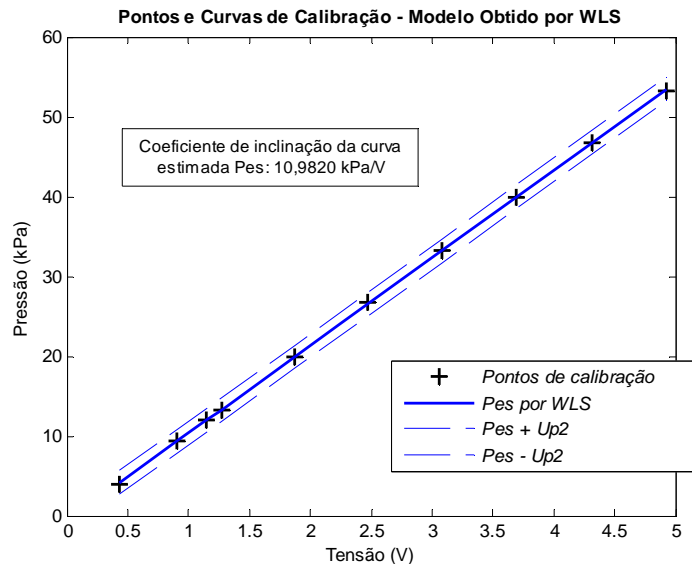


Figura 4.15: Pontos de calibração e curva estimada pelo modelo baseado nos mínimos quadrados ponderado (WLS) e incertezas associadas, para o sensor 1 (curva de subida). (+): pontos de calibração; (P_{es}): curva estimada de pressão pelo modelo resultante do ajuste linear e; ($P_{es} + U_{p2}$ e $P_{es} - U_{p2}$): curva estimada associada com a incerteza expandida.

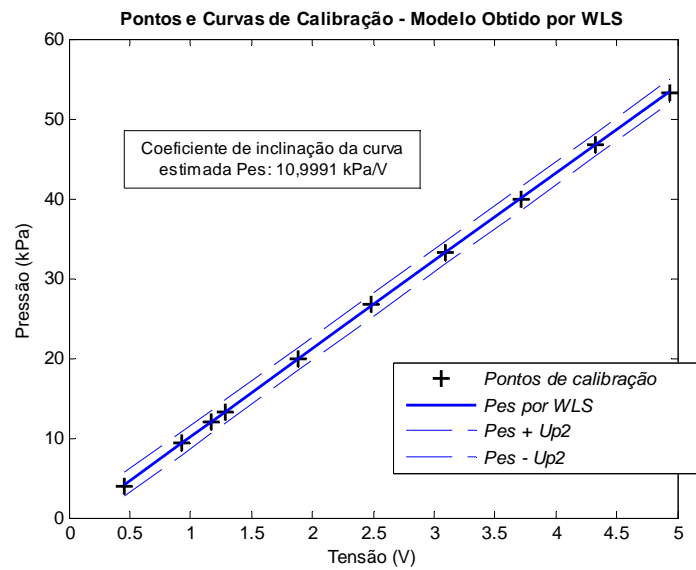


Figura 4.16: Pontos de calibração e curva estimada pelo modelo baseado nos mínimos quadrados ponderado (WLS) e incertezas associadas, para o sensor 1 (curva de descida). (+): pontos de calibração; (P_{es}): curva estimada de pressão pelo modelo resultante do ajuste linear e; ($P_{es} + U_{p2}$ e $P_{es} - U_{p2}$): curva estimada associada com a incerteza expandida.

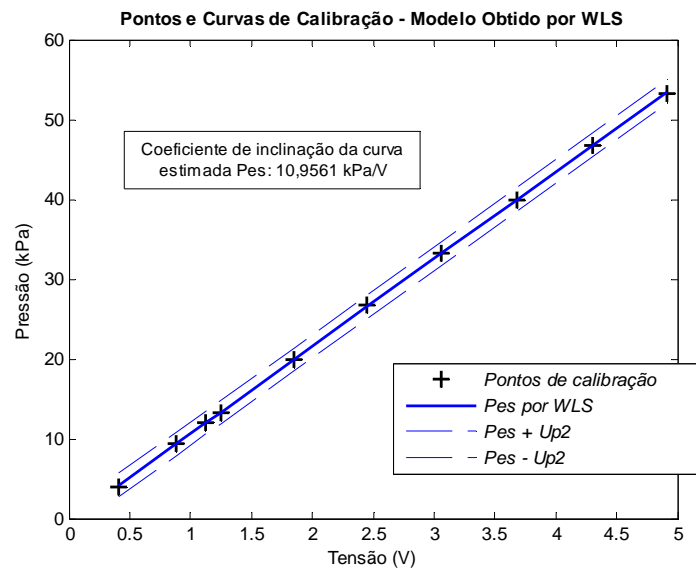


Figura 4.17: Pontos de calibração e curva estimada pelo modelo baseado nos mínimos quadrados ponderado (WLS) e incertezas associadas, para o sensor 2 (curva de subida). (+): pontos de calibração; (P_{es}): curva estimada de pressão pelo modelo resultante do ajuste linear e; ($P_{es} + U_{p2}$ e $P_{es} - U_{p2}$): curva estimada associada com a incerteza expandida.

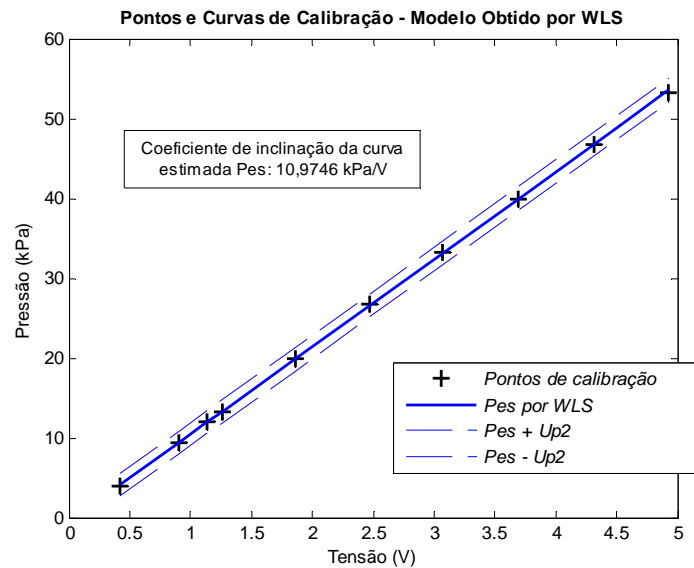


Figura 4.18: Pontos de calibração e curva estimada pelo modelo baseado nos mínimos quadrados ponderado (WLS) e incertezas associadas, para o sensor 2 (curva de descida). (+): pontos de calibração; (P_{es}): curva estimada de pressão pelo modelo resultante do ajuste linear e; ($P_{es} + U_{p2}$ e $P_{es} - U_{p2}$): curva estimada associada com a incerteza expandida.

4.3 Avaliação do Modelo Baseado em WLS, Construído com o Conjunto de Dados de Abril/2007 em Contrapartida com os Pontos de Calibração Levantados em Outubro/2007

Neste ponto do trabalho, faz-se uma avaliação do grau de adequação entre os pontos de calibração do segundo conjunto de dados (obtidos em outubro/2007) e as estimativas do modelo baseado no método dos mínimos quadrados ponderado e construído a partir do primeiro conjunto de dados (abril/2007).

Nesse sentido, foram calculadas as estimativas de medição (valores de pressão lidos pelo equipamento sob teste) a partir dos modelos inicialmente construídos, mas, utilizando-se como entrada, os valores de tensão obtidos para o segundo conjunto de dados. Em seguida, as estimativas foram confrontadas com os valores de pressão experimentais (de referência) aplicados ao medidor para, então, se avaliar se o modelo de calibração (e avaliação da incerteza) proposto em abril poderia continuar sendo válido para descrever o comportamento dos pontos de outubro; em outras palavras, se o equipamento sob teste manteve-se *calibrado*; ou, de outro modo, ainda, se o manovacuômetro digital poderia continuar sendo usado para medir as pressões respiratórias sem prejuízo da confiabilidade das medições, decorrido o espaço de tempo compreendido entre as duas coletas. Nas figuras de 4.19 a 4.22, são

apresentadas as curvas obtidas. Nota-se que os pontos de calibração de outubro permanecem dentro da faixa de pressão estimada pelo modelo de abril. Portanto, o equipamento permanece calibrado.

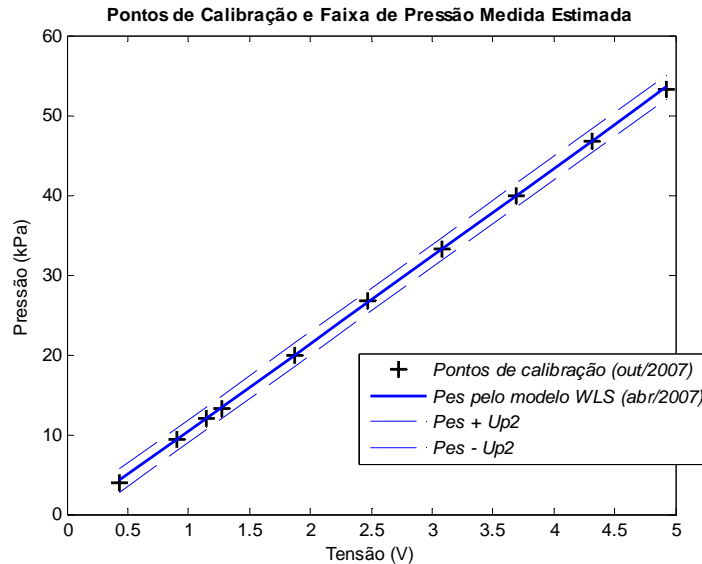


Figura 4.19: Confrontação dos pontos de calibração do primeiro conjunto de dados com a curva estimada pelo modelo baseado nos mínimos quadrados ponderado (WLS) e incertezas associadas a partir do segundo grupo de dados, para o sensor 1 (curva de subida). (+): pontos de calibração coletados em out/2007; (P_{es}): curva de pressão estimada pelo modelo baseado nos dados de abr/2007; ($P_{es} + U_{p2}$ e $P_{es} - U_{p2}$): curva estimada associada com a incerteza expandida.

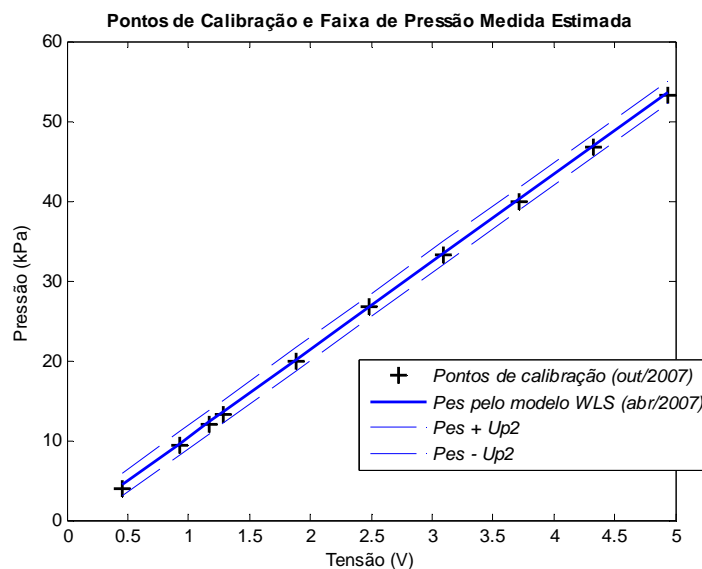


Figura 4.20: Confrontação dos pontos de calibração do primeiro conjunto de dados com a curva estimada pelo modelo baseado nos mínimos quadrados ponderado (WLS) e incertezas associadas a partir do segundo grupo de dados, para o sensor 1 (curva de descida). (+): pontos de calibração coletados em out/2007; (P_{es}): curva de pressão estimada pelo modelo baseado nos dados de abr/2007; ($P_{es} + U_{p2}$ e $P_{es} - U_{p2}$): curva estimada associada com a incerteza expandida.

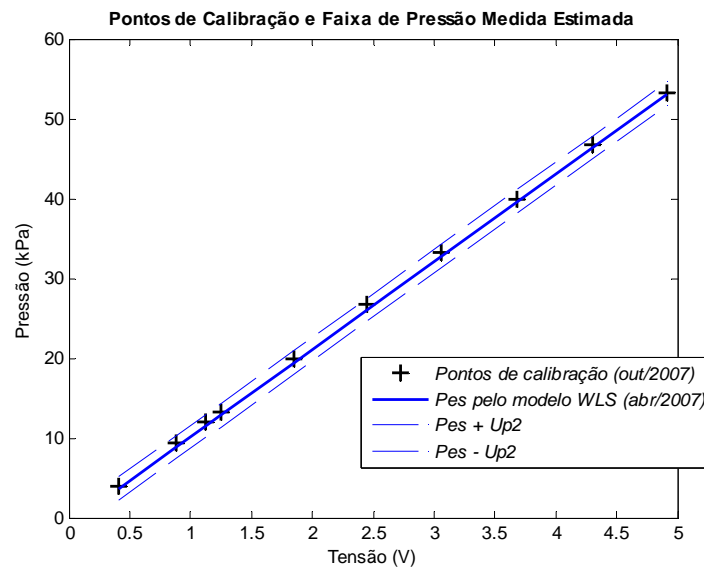


Figura 4.21: Confrontação dos pontos de calibração do primeiro conjunto de dados com a curva estimada pelo modelo baseado nos mínimos quadrados ponderado (WLS) e incertezas associadas a partir do segundo grupo de dados, para o sensor 2 (curva de subida). (+): pontos de calibração coletados em out/2007; (P_{es}): curva de pressão estimada pelo modelo baseado nos dados de abr/2007; ($P_{es} + U_{p2}$ e $P_{es} - U_{p2}$): curva estimada associada com a incerteza expandida.

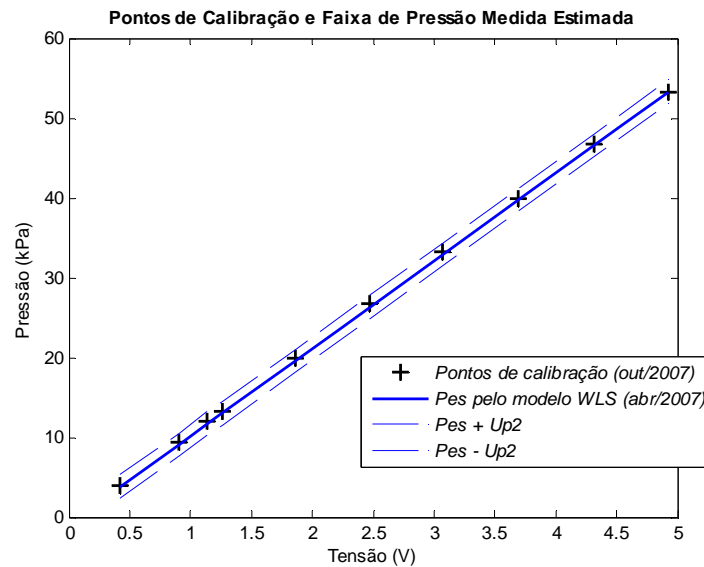


Figura 4.22: Confrontação dos pontos de calibração do primeiro conjunto de dados com a curva estimada pelo modelo baseado nos mínimos quadrados ponderado (WLS) e incertezas associadas a partir do segundo grupo de dados, para o sensor 2 (curva de descida). (+): pontos de calibração coletados em out/2007; (P_{es}): curva de pressão estimada pelo modelo baseado nos dados de abr/2007; ($P_{es} + U_{p2}$ e $P_{es} - U_{p2}$): curva estimada associada com a incerteza expandida.

CAPÍTULO V

DISCUSSÃO

A calibração implementada para o manovacuômetro digital desenvolvido no NEPEB revelou que os valores medidos para a tensão de saída dos sensores apresentam forte repetitividade. O valor máximo obtido para a incerteza Tipo A é de 0,72%, associado ao valor de tensão $V_m = 0,9257$ V, referente ao conjunto de dados levantados em abril de 2007, e de 3,09%, associado ao valor $V_m = 0,4119$ V levantados em outubro de 2007. Portanto, observou-se um aumento no valor da variabilidade das medições repetidas, ou da incerteza Tipo A, para os valores de tensão medidos na saída do medidor, decorridos seis meses entre as duas coletas de dados. Os próprios valores da média V_m sofreram pequenos deslocamentos que, juntamente com o aumento da variabilidade, contribuíram para modificar os valores dos parâmetros das curvas ajustadas. Entretanto, a modificação ocorrida não foi suficiente para fazer com que o modelo proposto com os dados de abril deixasse de continuar a ser válido para os dados levantados em outubro, conforme observado nas figuras 4.19 a 4.22.

Não foi constatada a existência de não-conformidade entre as curvas ajustadas pelo modelo WLS e os pontos experimentais, evidenciado pelo valor encontrado para a razão de Birge próximo à unidade, para ambos os conjuntos de dados. A variabilidade maior observada para V_m pode ter ocasionado a ocorrência de valores ligeiramente menores de B_i para os dados de outubro com relação aos pontos de calibração levantados em abril.

Analisando-se a incerteza expandida obtida para o protótipo, avaliada pelo modelo baseado na equação fornecida pelo fabricante do sensor, nota-se que os valores calculados apresentam tendência, variando entre 1,5 a 2,0 kPa (tabelas 4.7 e 4.15), tanto para o primeiro quanto para o segundo conjunto de dados coletados. Esse fato não ocorre para a incerteza expandida avaliada pelo modelo que utiliza a equação obtida pelo ajuste linear implementado empregando o método dos mínimos quadrados ponderado. Para este modelo, a incerteza possui valor oscilando entre 1,4 e 1,5 kPa para os dados levantados em abril de 2007 (Tabela 4.8) e um valor constante de 1,5 kPa para os dados coletados em outubro de 2007.

Outro detalhe considerado relevante é que todos os pontos de calibração ficaram situados dentro e próximos da região central da faixa estimada para a pressão pelo modelo WLS, compreendida entre $P_{es} \pm U_p$, o que pode ser verificado por meio das figuras 4.7 a 4.10 e das figuras 4.15 a 4.18. Isso não acontece em relação ao modelo construído a partir da equação do *datasheet* do sensor (figuras 4.3 a 4.6 e 4.11 a 4.14), pelo qual a maioria dos pontos de calibração situam-se próximos do limite ou fora da faixa considerada, indicando, com efeito, que este modelo apresenta valores menos confiáveis e até errôneos de estimativa da pressão medida pelo manovacuômetro do NEPEB. Através das figuras 5.1 e 5.2, vê-se, claramente, a diferença de estimativa entre os dois modelos, mostrada para a curva de subida do sensor 1 (dados coletados em outubro de 2007) e para a curva de descida do sensor 2 (dados coletados em abril de 2007).

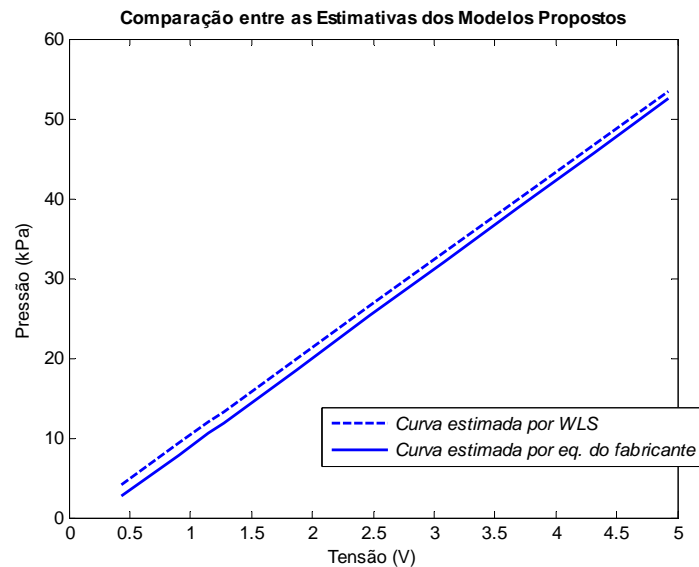


Figura 5.1: Diferença de pressão estimada pelo modelo WLS e pelo modelo baseado na equação do *datasheet* do sensor (eq.), considerando-se a curva de subida do sensor 1 (dados de out/2007).

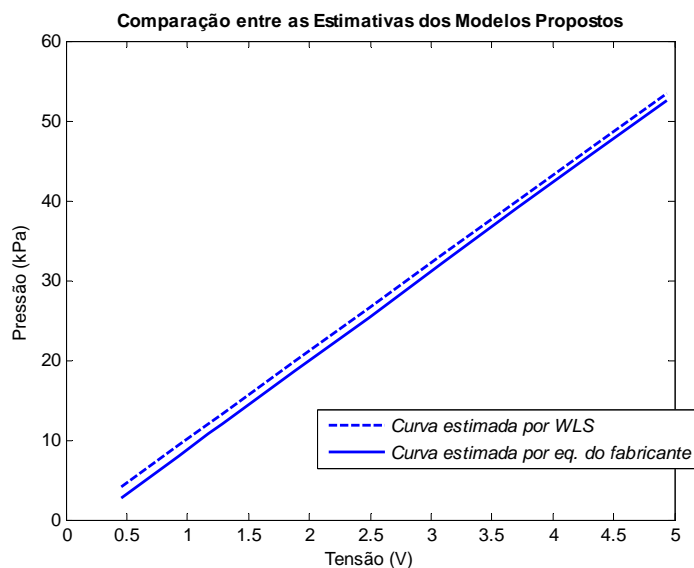


Figura 5.2: Diferença de pressão estimada pelo modelo WLS e pelo modelo baseado na equação do *datasheet* do sensor (eq.), considerando-se a curva de descida do sensor 2 (dados de abr/2007).

De acordo com o discutido por MATHIOULAKIS e BELESSIOTIS (2000), o método dos mínimos quadrados ponderado tem a vantagem de permitir a realização do cálculo dos parâmetros do modelo e suas incertezas com base nos valores medidos e suas incertezas experimentais reais em cada ponto de calibração. Este método, ainda, é particularmente útil quando a condição para avaliação da incerteza abrange uma faixa de valores ao invés de quando apenas se deseja calcular um único resultado. Além disso, desvios entre a estimativa do modelo metrológico e os dados reais podem ser atribuídos a erros experimentais ou à fraqueza do modelo. Assim, o modelo proposto para o cálculo da incerteza da medição baseado nos mínimos quadrados ponderado mostrou-se mais apropriado para a aplicação sob enfoque do que o modelo construído que utiliza a expressão do *datasheet* do sensor.

Portanto, se for considerada a calibração individual do sensor, o método dos mínimos quadrados ponderado provê um modelo metrológico melhor para o manovacuômetro digital. O fato da curva de calibração fornecida pelo fabricante do sensor constituir uma curva média que tenta descrever o comportamento de toda a produção reforça essa idéia. Vale a pena observar, no entanto, que a realização de um ajuste dos parâmetros da curva fornecida pelo fabricante poderá aproximá-la dos pontos de calibração, tornando, dessa forma, o modelo baseado nesta equação apto a descrever o comportamento metrológico do protótipo.

Com relação aos resultados dos ensaios de histerese e erro máximo de indicação, conforme indicado em INMETRO (1997), a análise foi empreendida somente para o modelo obtido por

WLS. O cálculo do valor de histerese foi realizado considerando-se as curvas médias obtidas para os dois sensores. Verificou-se que, tanto para o sensor 1 quanto para o sensor 2, os valores calculados relativamente baixos para a histerese permanecem dentro dos limites estabelecidos pelo INMETRO, referentemente aos esfigmomanômetros do tipo aneróide (0,5 kPa). Em relação ao primeiro conjunto de dados coletados, o valor máximo obtido para a histerese foi igual a 0,0639 kPa (0,48%), para o sensor 1, e 0,0842 kPa (0,16%), para o sensor 2. Quanto aos dados levantados em outubro de 2007, o valor máximo é de 0,0830 kPa (0,21%), para o sensor 1, e 0,1017 kPa (0,19%) para o sensor 2. Da mesma forma, o resultado obtido para o erro máximo de indicação ($\leq 0,1687$ kPa para os dados de abr/2007 e $\leq 0,2313$ kPa para os dados de out/2007) está dentro da faixa de tolerância preconizada pelo INMETRO para os esfigmomanômetros do tipo aneróide, cujo valor máximo não deve ultrapassar 0,4 kPa.

Conforme discutido em nota no Capítulo III, mesmo o INMETRO tendo publicado em fevereiro de 2008, posteriormente ao desenvolvimento deste trabalho, um documento orientativo para calibração de medidores digitais de pressão (INMETRO, 2008), verificou-se que os procedimentos aqui adotados para calibrar e avaliar a incerteza de medição do manovacuômetro digital são plenamente compatíveis com a metodologia descrita naquele documento. Inclusive, o método sugerido por INMETRO (2008) para cálculo dos parâmetros de ajuste linear por WLS (que é também indicado no GUM) já havia sido implementado paralelamente ao método de cálculo utilizado neste trabalho, descrito em MATHIOULAKIS e BELESSIOTIS (2000), a fim de se comparar o grau de concordância entre os valores obtidos por eles. Foi constatado, então, que os resultados obtidos por ambos os métodos são coincidentes.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÃO

Por meio do método dos mínimos quadrado ponderado (WLS), pode-se implementar a calibração do manovacuômetro digital desenvolvido pelo Núcleo de Estudos e Pesquisa em Engenharia Biomédica da Escola de Engenharia da UFMG em parceria com o Departamento de Fisioterapia da EFITO/UFMG. Nesse sentido, foram levantadas curvas de calibração para os sensores do equipamento, em cuja entrada foram aplicados determinados valores de pressão. O sinal de saída dos sensores corresponde a valores analógicos de tensão que são digitalizados e transmitidos a um microcomputador através de uma interface USB e, finalmente, lidos na tela do computador.

A aplicação do ajuste linear por WLS permitiu o cálculo dos parâmetros das curvas de calibração e suas incertezas para os dois sensores do manovacuômetro, utilizando-se dados coletados em duas etapas (abril e outubro de 2007), com intervalo de seis meses entre as coletas. Ao se comparar os valores dos parâmetros obtidos para os dois conjuntos de dados coletados, foi constatado que não houve modificações consideráveis entre eles.

Os resultados obtidos para os dois modelos propostos para se estimar a incerteza de medição do equipamento revelam que o modelo construído com base na expressão do *datasheet* do sensor, relacionando a pressão aplicada com a tensão de saída, é caracterizado por apresentar forte tendência para os valores calculados. Em contrapartida, o modelo baseado na equação das curvas levantadas durante a calibração pelo método dos mínimos quadrados ponderado não mostra tal comportamento, sendo o valor para incerteza expandida praticamente constante para os dados coletados em abril (oscilando entre 1,4 e 1,5 kPa) e para os dados coletados em outubro (igual a 1,5 kPa). Ressalta-se que esses valores correspondem ao nível máximo de incerteza, considerando-se a exatidão do sensor para temperaturas de 0 a 85°C (FREESCALE, 2004).

Além disso, verificou-se que os valores de pressão estimados pelo modelo WLS associados às incertezas de medição apresentam menores desvios em relação aos pontos experimentais.

Confrontando-se os resultados obtidos ao apresentado na literatura que discorre sobre o assunto, conclui-se, que, considerando-se ambos os modelos propostos, o modelo baseado nos mínimos quadrados ponderado apresenta-se mais apropriado para a aplicação em estudo.

É relevante observar que, entre as contribuições de incerteza consideradas para a estimação dos valores estimados para a incerteza do manovacuômetro, algumas são relativamente grandes em relação às outras, sendo que entre elas, há, ainda, as que não são comparáveis em magnitude com outras contribuições usadas nos cálculos. As considerações de COX e HARRIS (2006), descritas aqui no Capítulo II, ponderam que, nessas circunstâncias, a metodologia proposta no Suplemento I do GUM pode prover resultados mais confiáveis do que aquela proposta no GUM para o cálculo da incerteza. Com efeito, como sugestão para trabalhos futuros, os métodos apresentados no Suplemento I do GUM, baseados no teorema de Bayes, e mesmo outros baseados em FV ou RFV, deverão ser aplicados para o cálculo de incerteza do medidor de pressões respiratórias máximas, objetivando a investigação de o quanto as contribuições de incerteza assinaladas acima, alteram ou comprometem os resultados aqui obtidos.

Em trabalhos futuros, ainda, deverão ser realizados novos levantamentos de dados utilizando-se o manovacuômetro digital, a fim de se avaliar qual periodicidade deve ser estabelecida para que o equipamento seja submetido a novos processos de calibração. A relevância da inserção ou retirada de grandezas de influência nos modelos também deverá ser analisada; como é o caso da incerteza associada ao conversor A/D e a influência da variação de temperatura. É notório, por exemplo, que algumas características do sensor utilizado na construção do protótipo (Tabela 3.1) são referentes à faixa de temperatura entre 0 e 85°C, inclusive a sua exatidão, que é uma das contribuições de incerteza que fortemente influenciam nos resultados aqui obtidos. Cumpre investigar se, para um ambiente onde há temperatura controlada (laboratórios, clínicas, etc.), tais características teriam seus valores mantidos ou seriam alterados. Além disso, sensores com melhores níveis de exatidão poderão ser utilizados na construção do protótipo, a fim de se conseguir menores valores de incerteza da medição.

Finalmente, por meio da análise empreendida, pôde-se constatar que o manovacuômetro digital desenvolvido pelo NEPEB poderá ser utilizado em laboratórios de pesquisa para medição de pressões respiratórias máximas e, espera-se que, brevemente ele esteja sendo utilizado em aplicações clínicas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT; INMETRO. **GUM – Guia para expressão da incerteza de medição**. Terceira edição brasileira em língua portuguesa. Rio de Janeiro, 2003. 120p.

ANVISA. Boas práticas de aquisição de equipamentos médico-hospitalares. **Boletim Informativo de Tecnovigilância**. Brasília, 2004. 11p.

ANVISA. Certificados de calibração. **Boletim Informativo de Tecnovigilância**. Brasília, 2004. 5p.

BLACK, L.; HYATT, R. Maximal respiratory pressures: normal values and relationship to age and sex. **Am. Rev. Resp. Dis.**, v. 99, p. 696-702, 1969.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. INMETRO. Portaria nº 86 de 3 de abril de 2006. **Regulamento de avaliação da conformidade para equipamentos eletromédicos**. Dispõe sobre a avaliação da conformidade para equipamentos eletromédicos.

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Gestão de Investimentos em Saúde. Projeto REFORSUS. CALIL, S.; GOMIDE, E. (Coord.). **Equipamentos médico-hospitalares e o gerenciamento da manutenção: capacitação à distância**. Brasília: 2002. 720p.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria nº 2043 de 12 de dezembro de 1994. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 13 dez. 1994. Institui o sistema de garantia da qualidade de produtos correlatos submetidos ao regime da Lei nº 6.360, de 27 de setembro de 1976 e o Decreto nº 79.094, de 05 de janeiro de 1977.

BRASIL. Ministério da Saúde. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução RDC nº 32 de 29 de maio de 2007. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, 01 jun. 2007. Dispõe sobre a certificação compulsória dos equipamentos elétricos sob regime de Vigilância Sanitária e dá outras providências.

CARVALHO, M. **Avaliação da conformidade de veículos terrestres. Análise metrológica e modernização de um sistema para medição de velocidade.** 2004. 168p. Dissertação (Mestrado em Metrologia para a Qualidade e Inovação). Programa de Pós-Graduação em Metrologia para a Qualidade e Inovação, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

CORRÊA, A. **Confiabilidade metrológica no setor da saúde no Brasil: estudo de caso: qualidade laboratorial na saúde pública e controle metrológico de equipamentos médico-hospitalares.** 2001. 144p. Dissertação (Mestrado em Metrologia para a Qualidade Industrial). Programa de Pós-Graduação em Metrologia para a Qualidade Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

COX, M.; HARRIS, P. Measurement uncertainty and traceability. **Meas. Sci. Technol.**, 17, p. 533-540, Jan. 2006.

FERNANDES, J., CARVALHO Z.; SCHECHTER, H. Do clássico ao quântico – os padrões de resistência elétrica do INMETRO. In: SEMETRO: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE METROLOGIA ELÉTRICA, 7., 2007, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: UFMG, RMMG, INMETRO e SBM, 2007. 1 CD-ROM.

FERREIRA, J.; PEREIRA, N.; OLIVEIRA JÚNIOR, M.; SILVA, J.; BRITTO, R.; PARREIRA, V.; VASCONCELOS, F.; TIERRA-CRIOLLO, C. Application of weighted least squares to calibrate a digital system for measuring the respiratory pressures. In: BIODEVICES: INTERNATIONAL CONFERENCE ON BIOMEDICAL ELECTRONICS AND DEVICES, 1., 2008, Funchal. **Proceedings...** Funchal: Institute for Systems and Technologies of Information, Control and Communication, 2008. v. 1, 279 p. p. 220-223.

FERREIRA, J.; PEREIRA, N.; OLIVEIRA JÚNIOR, M.; SILVA, J.; BRITTO, R.; PARREIRA, V.; VASCONCELOS, F.; TIERRA-CRIOLLO, C. Calibração e cálculo da incerteza para um medidor digital de pressões respiratórias. In: SEMETRO: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE METROLOGIA ELÉTRICA, 7., 2007, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: UFMG, RMMG, INMETRO e SBM, 2007. 1 CD-ROM.

FERRERO, A. Uncertainty in measurement: is there a comprehensive mathematical theory to express it? In: SEMETRO: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE METROLOGIA ELÉTRICA, 7., 2007, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: UFMG, RMMG, INMETRO e SBM, 2007. 1 CD-ROM.

FERRERO, A.; SALICONE, S. A comparative analysis of the statistical and random-fuzzy approaches in the expression of uncertainty in measurement. **IEEE Trans. Instrum. Meas.**, v. 54, n. 4, p. 1475-1481, Aug. 2005.

FERRERO, A.; SALICONE, S. Measurement uncertainty. **IEEE Instrum. Meas. Mag.**, p. 44-51, June 2006.

FREESCALE. **Integrated silicon pressure sensor on-chip signal conditioned, temperature compensated and calibrated.** rev. 7, oct. 2004. Disponível em: <www.freescale.com>. Acesso em: 03 nov. 2005.

FULLER, W. **Measurement error models.** N. York: John Wiley, 1987. 440p.

GUIMARÃES, F.; ALVES, F.; CONSTANTINO, S; DIAS, C; MENEZES, S. Avaliação da pressão inspiratória máxima em pacientes críticos não-cooperativos: comparação entre dois métodos. **Rev. Bras. Fisioter.**, São Carlos, v. 11, n. 3, p. 233-238, maio/jun. 2007.

ICHINOSE, R. **Impacto de mecanismo externo de avaliação hospitalar segundo a opinião de funcionários: o caso da certificação ISO9000.** 2004. 152p. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Biomédica). Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

INMETRO. **DOQ-CGCRE-014 – Orientações para a realização de calibração de medidores digitais de pressão.** Documento de caráter orientativo. INMETRO, Rio de Janeiro, fev. 2008. 9p.

INMETRO. **DOQ-CGCRE-017 – Orientações para a realização de calibração de medidores analógicos de pressão.** Documento de caráter orientativo. INMETRO, Rio de Janeiro, maio 2006. 13p.

INMETRO. Homepage. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br>>. Acesso em: 20 de ago. 2007.

INMETRO. **NIE-DIMEL-006 – Procedimento de verificação de esfigmomanômetros do tipo aneróide**. INMETRO, Rio de Janeiro, jun. 1997. 10p.

INMETRO. **Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia**. 4. ed. Rio de Janeiro, 2005. 75p.

JCGM. **Evaluation of measurement data – Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” – Propagation of distributions using a Monte Carlo method**”. Sèvres Cedex: BIPM e JCGM, 2007.

KIND, D.; LÜBBIG, H. Metrology – the present meaning of a historical term. **Metrologia**, 40, p. 255-257, Sept. 2003.

KORCZYNSKI, M.; HETMAN, A. A calculation of uncertainties in virtual instrument. In: IMTC: INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT TECHNOLOGY CONFERENCE, 22., 2005, Ottawa. **Proceedings...** Ottawa: IEEE Instrumentation and Measurement Society, 2005. p. 1697-1701.

LAGHI, F.; TOBIN, M. Disorders of the respiratory muscles. **Am. J. Respir. Crit. Care Med.**, 168 (1), p. 10-48, 2003 apud PEREIRA, C. Bases e aplicações clínicas dos testes de função pulmonar. **Rev. Bras. Med. Trab.**, Belo Horizonte, v. 2, n. 4, p. 317-330, out./dez. 2004.

LIRA, I. Curve adjustment by the least-squares method. **Metrologia**, 37, p. 677-681, 2000.

LIRA, I. **Evaluating the measurement uncertainty: fundamentals and practical guidance**. Bristol and Philadelphia: IoP, 2002. 243p.

LIRA, I; WÖGER, W. Comparison between the conventional and Bayesian approaches to evaluate measurement data. **Metrologia**, 43, p. S249-S259, Aug. 2006.

MATHIOULAKIS, E.; BELESSIOTIS, V. Uncertainty and traceability in calibration by comparison. **Meas. Sci. Technol.**, 11, p. 771-775, 2000.

MICROCHIP. **Emulating RS-232 over USB with PIC18F4550 - Microchip Technology Inc.** Disponível em: <http://techtrain.microchip.com/webseminars/documents/EmulatingRS232overUSB_121004.pdf>. Acesso em: 01 maio 2007.

MICROCHIP. **Migrating Applications to USB from RS-232 UART with Minimal Impact on PC Software.** Disponível em: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00956b.pdf>>. Acesso em: 01 maio 2007.

MUNIZ, D. **Desenvolvimento de software para sistemas de medição do fluxo respiratório e pressões respiratórias máximas.** 2007. 40p. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

NUCCIO, S.; SPATARO, C. Approach to evaluate the virtual instrumentation measurement uncertainties. In: IMTC: INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT TECHNOLOGY CONFERENCE, 18., 2001, Budapest. **Proceedings...** Budapest: IEEE Instrumentation and Measurement Society, 2001. p. 84-89.

OLIVEIRA JÚNIOR, M.; MARTINS, H.; TIERRA-CRIOLLO, C. **Sistema embutido para aquisição de sinais biológicos utilizando um microcontrolador.** 2007. Trabalho de Iniciação Científica. (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

PAPOULIS, A.; PILLAI, S. **Probability, random variables, and stochastic processes.** 4th ed. New York: McGraw-Hill, 2002. 852 p.

PARVIS, M.; VALLAN, A. Medical measurements and uncertainties. **IEEE Instrum. Meas. Mag.**, p. 12–17, June 2002.

PEREIRA, C. Bases e aplicações clínicas dos testes de função pulmonar. **Rev. Bras. Med. Trab.**, Belo Horizonte, v. 2, n. 4, p. 317-330, out./dez. 2004.

PIC18FUSB. **About Microchip USB PIC (PIC18F2550, PIC18F4550...)**. Disponível em: <<http://pic18fusb.online.fr/wiki/wikka.php?wakka=WikiHome>>. Acesso em: 01 maio 2007.

PRESS, W.; TEUKOLSKY, S.; VETTERLING, W.; FLANNERY, B. **Numerical recipes in C: the art of scientific computing**. 2nd ed. Cambridge: University Press, 1992. 994p.

SILVA, J. **Desenvolvimento de um sistema digital de medição das pressões respiratórias máximas**. 2006. 59p. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

STOCK, M. Watt balance experiments: towards an improved SI system. In: SEMETRO: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE METROLOGIA ELÉTRICA, 7., 2007, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: UFMG, RMMG, INMETRO e SBM, 2007. 1 CD-ROM.

WEBSTER, J. (Ed.). **Medical instrumentation: application and design**. 3rd edition. New York: Wiley, 1998. cap. 1, p. 1-43.

WEBSTER, J. (Ed.). **The measurement, instrumentation, and sensors handbook**. CRC Press LLC, 1999. cap. 5. Disponível em: <<http://www.engnetbase.com>>. Acesso em: 15 maio 2008.

WEISE, K.; WÖGER, W. Removing model and data non-conformity in measurement evaluation. **Meas. Sci. Technol.**, 11, p. 1649-1658, 2000.

ANEXO A

Freescale Semiconductor
 Technical Data

MPX5050
 Rev. 7, 10/2004

Integrated Silicon Pressure Sensor On-Chip Signal Conditioned, Temperature Compensated and Calibrated

The MPX5050/MPXV5050G series piezoresistive transducer is a state-of-the-art monolithic silicon pressure sensor designed for a wide range of applications, but particularly those employing a microcontroller or microprocessor with A/D inputs. This patented, single element transducer combines advanced micromachining techniques, thin-film metallization, and bipolar processing to provide an accurate, high level analog output signal that is proportional to the applied pressure.

Features

- 2.5% Maximum Error over 0° to 85°C
- Ideally suited for Microprocessor or Microcontroller-Based Systems
- Temperature Compensated Over - 40° to +125°C
- Patented Silicon Shear Stress Strain Gauge
- Durable Epoxy Unibody Element
- Easy-to-Use Chip Carrier Option

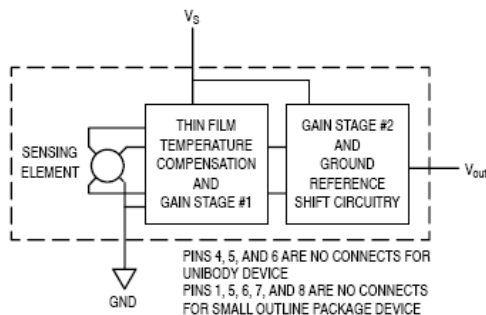
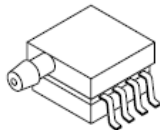
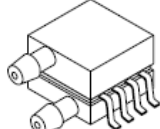


Figure 1. Fully Integrated Pressure Sensor Schematic

**SMALL OUTLINE PACKAGE
 SURFACE MOUNT**



**MPXV5050GP
 CASE 1369**



**MPX5050DP
 CASE 1351**

| PIN NUMBER | | | |
|------------|------------------|---|-----|
| 1 | N/C | 5 | N/C |
| 2 | V _S | 6 | N/C |
| 3 | Gnd | 7 | N/C |
| 4 | V _{out} | 8 | N/C |

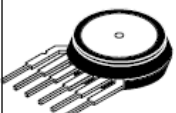
NOTE: Pins 1, 5, 6, 7, and 8 are internal device connections. Do not connect to external circuitry or ground. Pin 1 is noted by the notch in the lead.

**MPX5050
 MPXV5050G
 SERIES**

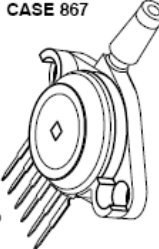
Freescale Semiconductor Preferred Device

**INTEGRATED
 PRESSURE SENSOR**
 0 to 50 kPa (0 to 7.25 psi)
 0.2 to 4.7 Volts Output

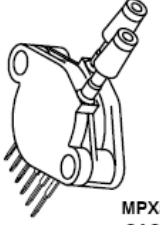
UNIBODY PACKAGE



**MPX5050D
 CASE 867**



**MPX5050GP
 CASE 867B**



**MPX5050DP
 CASE 867C**

| PIN NUMBER | | | |
|------------|------------------|---|-----|
| 1 | V _{out} | 4 | N/C |
| 2 | Gnd | 5 | N/C |
| 3 | V _S | 6 | N/C |

NOTE: Pins 4, 5, and 6 are internal device connections. Do not connect to external circuitry or ground. Pin 1 is noted by the notch in the lead.

MAXIMUM RATINGS(NOTE)

| Parameters | Symbol | Value | Unit |
|----------------------------|-----------|---------------|------|
| Maximum Pressure (P1 > P2) | P_{max} | 200 | kPa |
| Storage Temperature | T_{stg} | -40° to +125° | °C |
| Operating Temperature | T_A | -40° to +125° | °C |

NOTE: Exposure beyond the specified limits may cause permanent damage or degradation to the device.

OPERATING CHARACTERISTICS ($V_S = 5.0$ Vdc, $T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted, $P1 > P2$. Decoupling circuit shown in Figure 4 required to meet electrical specifications.)

| Characteristic | Symbol | Min | Typ | Max | Unit |
|---|-----------|-------|-------|-------|-------------|
| Pressure Range ⁽¹⁾ | P_{OP} | 0 | — | 50 | kPa |
| Supply Voltage ⁽²⁾ | V_S | 4.75 | 5.0 | 5.25 | Vdc |
| Supply Current | I_o | — | 7.0 | 10.0 | mAdc |
| Minimum Pressure Offset ⁽³⁾ @ $V_S = 5.0$ Volts | $V_{o\#}$ | 0.088 | 0.20 | 0.313 | Vdc |
| Full Scale Output ⁽⁴⁾ @ $V_S = 5.0$ Volts | V_{FSO} | 4.587 | 4.70 | 4.813 | Vdc |
| Full Scale Span ⁽⁵⁾ @ $V_S = 5.0$ Volts | V_{FSS} | — | 4.50 | — | Vdc |
| Accuracy ⁽⁶⁾ | — | — | — | ± 2.5 | % V_{FSS} |
| Sensitivity | V/P | — | 90 | — | mV/kPa |
| Response Time ⁽⁷⁾ | t_R | — | 1.0 | — | ms |
| Output Source Current at Full Scale Output | I_{o+} | — | 0.1 | — | mAdc |
| Warm-Up Time ⁽⁸⁾ | — | — | 20 | — | ms |
| Offset Stability ⁽⁹⁾ | — | — | ± 0.5 | — | % V_{FSS} |

NOTES:

- 1.0kPa (kiloPascal) equals 0.145 psi.
- Device is ratiometric within this specified excitation range.
- Offset ($V_{o\#}$) is defined as the output voltage at the minimum rated pressure.
- Full Scale Output (V_{FSO}) is defined as the output voltage at the maximum or full rated pressure.
- Full Scale Span (V_{FSS}) is defined as the algebraic difference between the output voltage at full rated pressure and the output voltage at the minimum rated pressure.
- Accuracy (error budget) consists of the following:
 - Linearity: Output deviation from a straight line relationship with pressure over the specified pressure range.
 - Temperature Hysteresis: Output deviation at any temperature within the operating temperature range, after the temperature is cycled to and from the minimum or maximum operating temperature points, with zero differential pressure applied.
 - Pressure Hysteresis: Output deviation at any pressure within the specified range, when this pressure is cycled to and from minimum or maximum rated pressure at 25°C.
 - TcSpan: Output deviation over the temperature range of 0° to 85°C, relative to 25°C.
 - TcOffset: Output deviation with minimum pressure applied, over the temperature range of 0° to 85°C, relative to 25°C.
 - Variation from Nominal: The variation from nominal values, for Offset or Full Scale Span, as a percent of V_{FSS} at 25°C.
- Response Time is defined as the time for the incremental change in the output to go from 10% to 90% of its final value when subjected to a specified step change in pressure.
- Warm-up Time is defined as the time required for the product to meet the specified output voltage after the Pressure has been stabilized.
- Offset Stability is the product's output deviation when subjected to 1000 hours of Pulsed Pressure, Temperature Cycling with Bias Test.

MECHANICAL CHARACTERISTICS

| Characteristics | Typ | Unit |
|-----------------------------------|-----|-------|
| Weight, Basic Element (Case 867) | 4.0 | grams |
| Weight, Basic Element (Case 1369) | 1.5 | grams |

MPX5050 MPXV5050G SERIES

Sensor Device Data
Freescale Semiconductor

Figure 3 illustrates the Differential/Gauge Sensing Chip in the basic chip carrier (Case 867). A fluorosilicone gel isolates the die surface and wire bonds from the environment, while allowing the pressure signal to be transmitted to the sensor diaphragm.

The MPX5050/MPXV5050G series pressure sensor operating characteristics, and internal reliability and qualification tests are based on use of dry air as the pressure media. Media, other than dry air, may have adverse effects on sensor performance and long-term reliability. Contact the factory for

information regarding media compatibility in your application.

Figure 2 shows the sensor output signal relative to pressure input. Typical, minimum, and maximum output curves are shown for operation over a temperature range of 0° to 85°C using the decoupling circuit shown in Figure 4. The output will saturate outside of the specified pressure range.

Figure 4 shows the recommended decoupling circuit for interfacing the output of the integrated sensor to the A/D input of a microprocessor or microcontroller. Proper decoupling of the power supply is recommended.

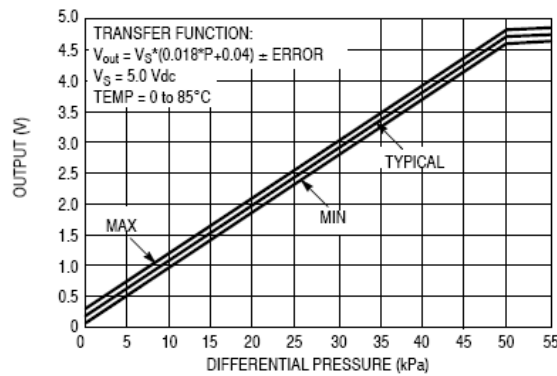


Figure 2. Output versus Pressure Differential

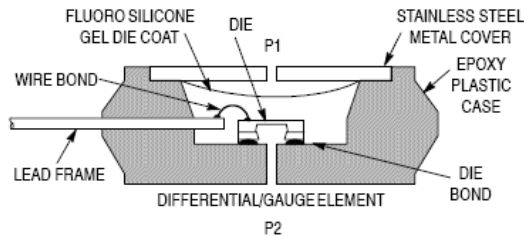


Figure 3. Cross-Sectional Diagram (Not to Scale)

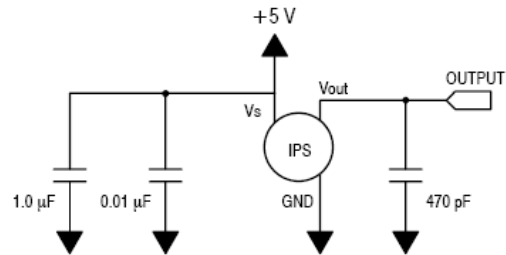
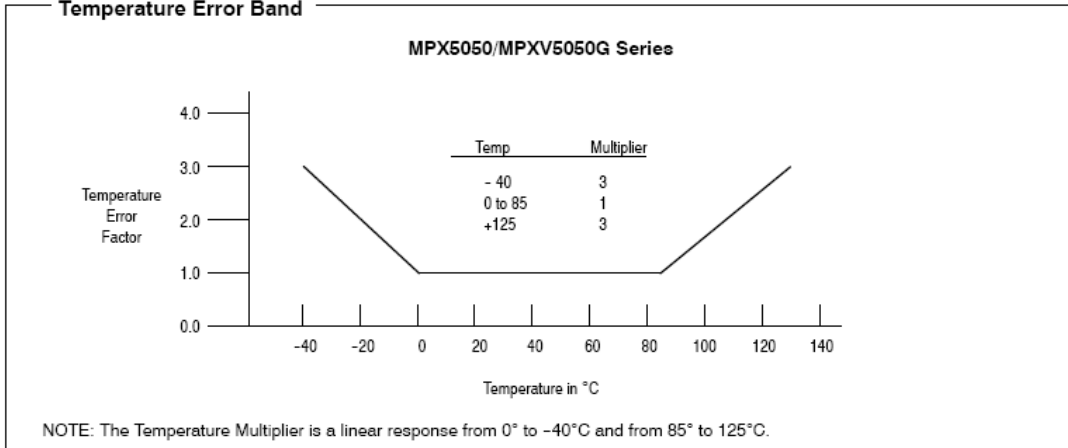


Figure 4. Recommended power supply decoupling and output filtering.
 For additional output filtering, please refer to Application Note AN1646.

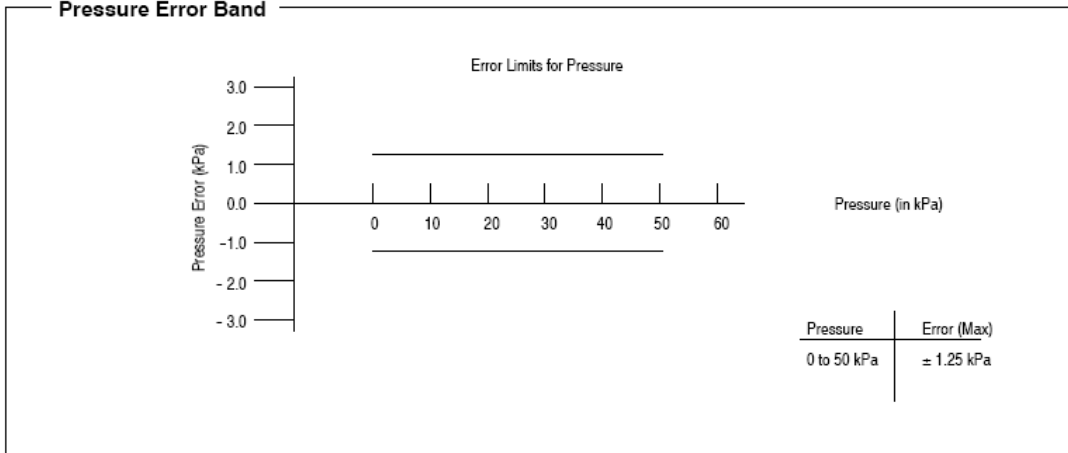
Transfer Function

Nominal Transfer Value: $V_{out} = V_S (P \times 0.018 + 0.04)$
 \pm (Pressure Error \times Temp. Factor $\times 0.018 \times V_S$)
 $V_S = 5.0 \text{ V} \pm 0.25 \text{ Vdc}$

Temperature Error Band



Pressure Error Band



PRESSURE (P1) / VACUUM (P2) SIDE IDENTIFICATION TABLE

Freescale Semiconductor designates the two sides of the pressure sensor as the Pressure (P1) side and the Vacuum (P2) side. The Pressure (P1) side is the side containing fluoro-silicone gel which protects the die from harsh media. The Freescale Semiconductor MPX pressure sensor is designed

to operate with positive differential pressure applied, $P1 > P2$.

The Pressure (P1) side may be identified by using the table below:

| Part Number | Case Type | Pressure (P1) Side Identifier |
|-------------|-----------|-------------------------------|
| MPX5050D | 867 | Stainless Steel Cap |
| MPX5050DP | 867C | Side with Part Marking |
| MPX5050GP | 867B | Side with Port Attached |
| MPXV5050GP | 1369 | Side with Port Attached |
| MPXV5050DP | 1351 | Side with Part Marking |

ORDERING INFORMATION — UNIBODY PACKAGE (MPX5050 SERIES)

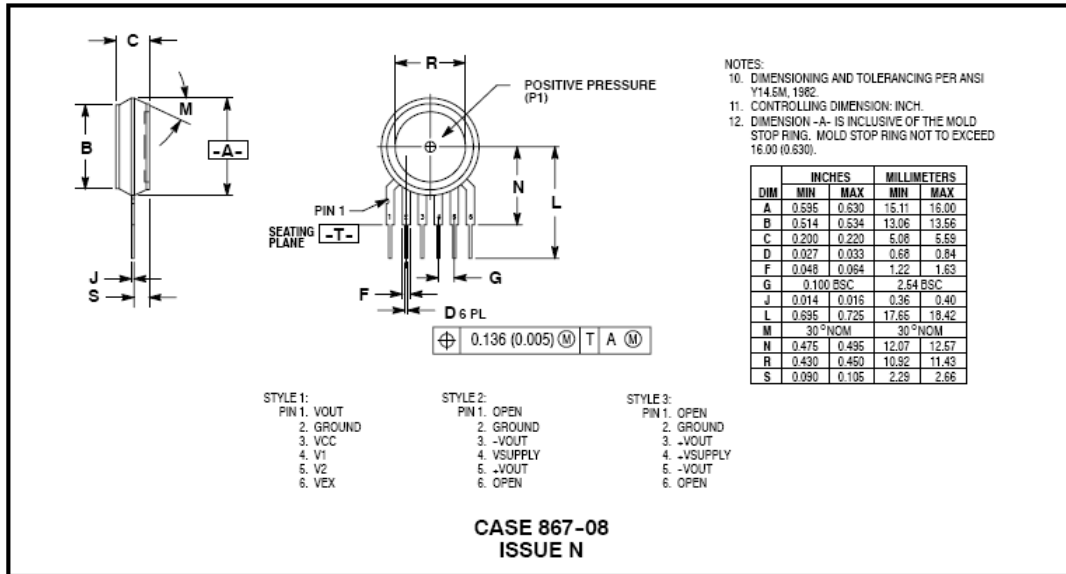
| Device Type | Options | Case Type | MPX Series | |
|-----------------|-------------------------|-----------|--------------|----------------|
| | | | Order Number | Device Marking |
| Basic Element | Differential | 867 | MPX5050D | MPX5050D |
| Ported Elements | Differential Dual Ports | 867C | MPX5050DP | MPX5050DP |
| | Gauge | 867B | MPX5050GP | MPX5050GP |

ORDERING INFORMATION — SMALL OUTLINE PACKAGE (MPXV5050G SERIES)

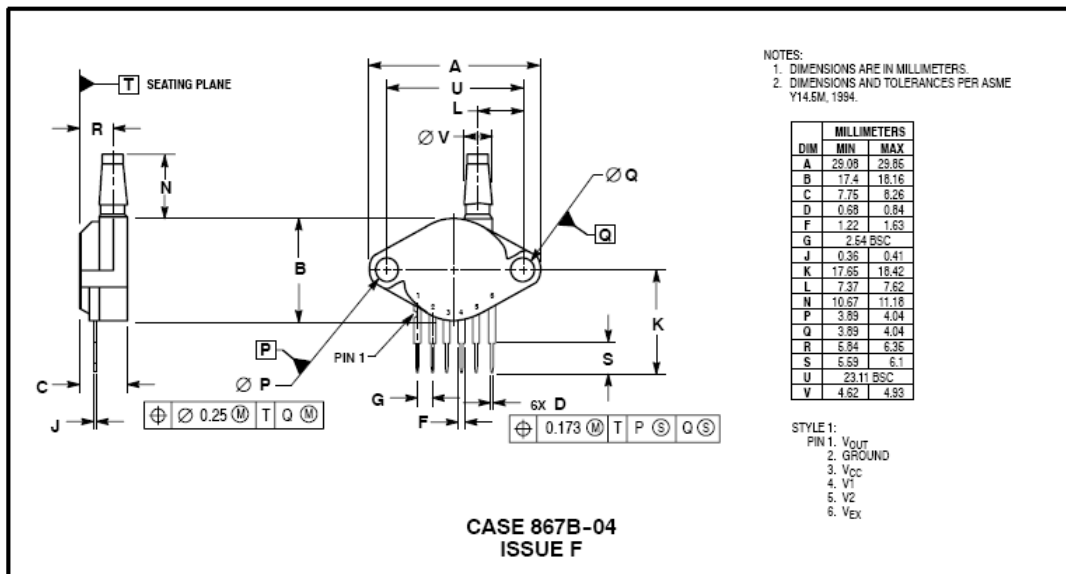
| Device Type | Options | Case No. | MPX Series Order No. | Packing Options | Marking |
|-----------------|-----------|----------|----------------------|-----------------|-----------|
| Ported Elements | Side Port | 1369 | MPXV5050GP | Trays | MPXV5050G |
| | Dual Port | 1351 | MPXV5050DP | Trays | MPXV5050G |

MPX5050 MPXV5050G SERIES

**PACKAGE DIMENSIONS
UNIBODY PACKAGE**

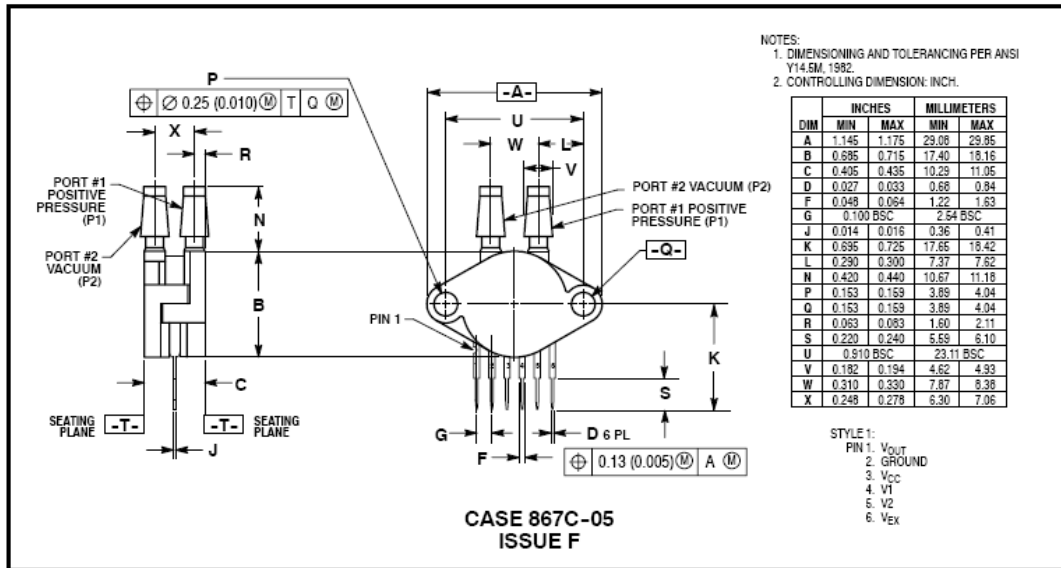


BASIC ELEMENT



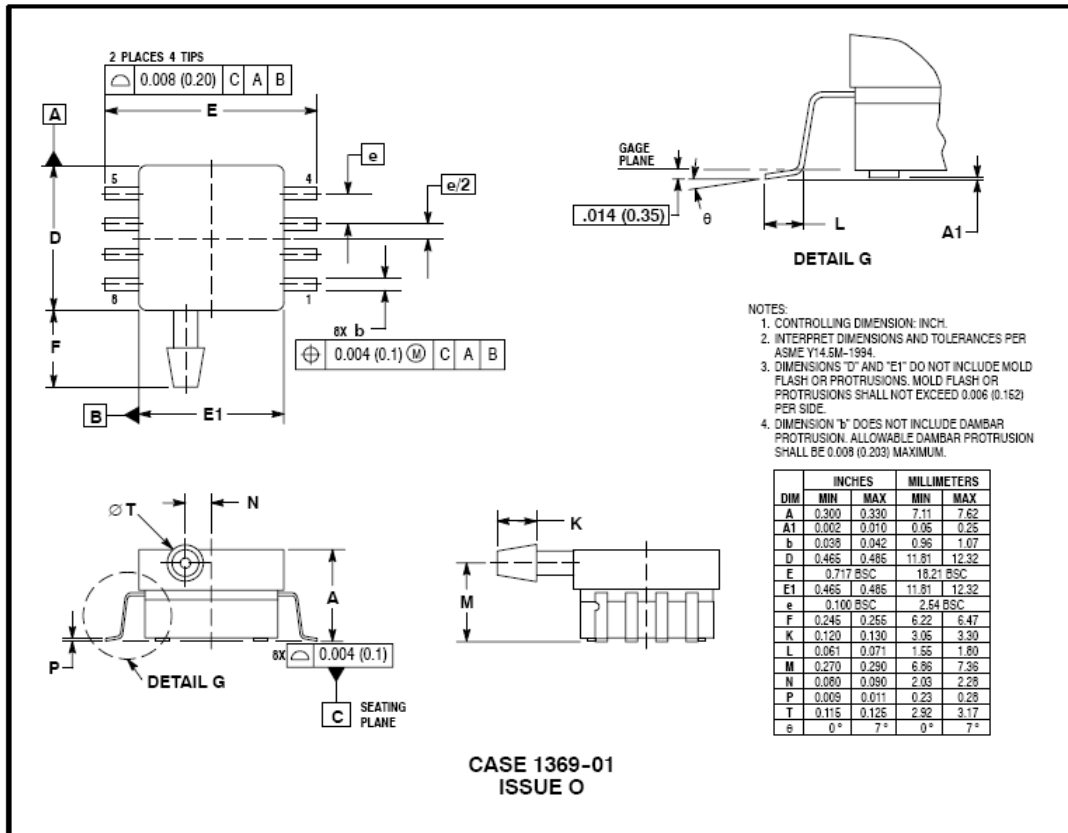
PRESSURE SIDE PORTED (AP, GP)

PACKAGE DIMENSIONS-CONTINUED
UNIBODY PACKAGE



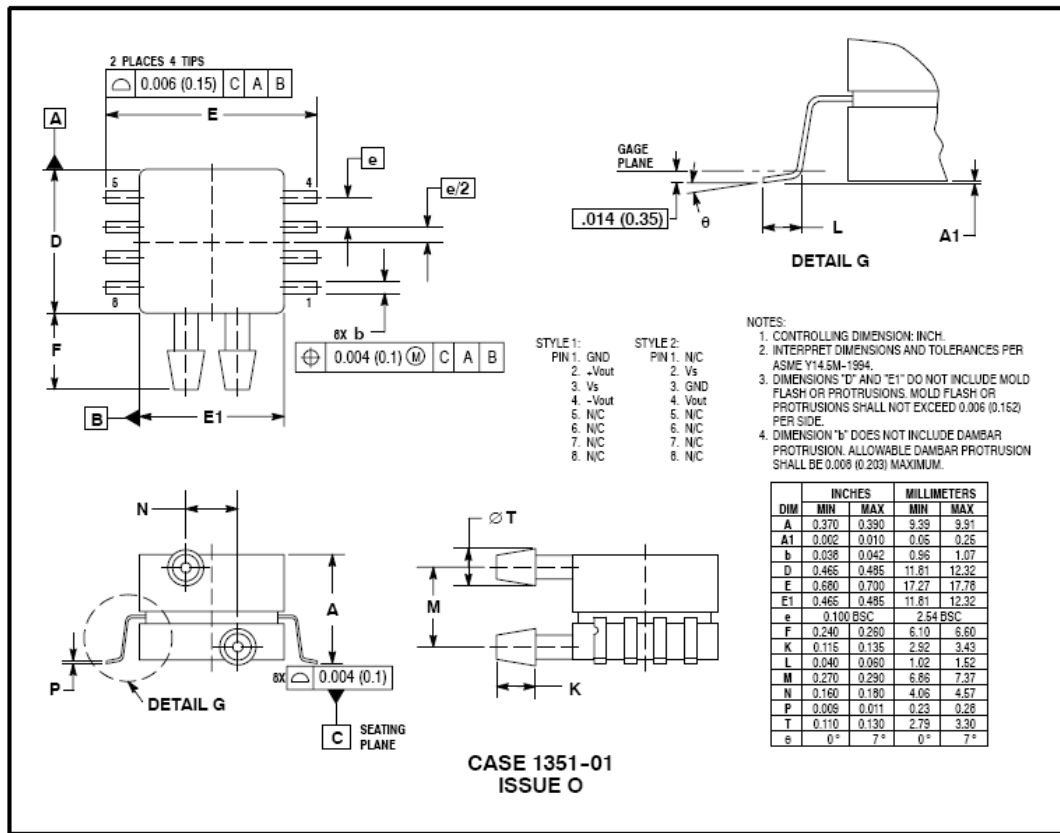
PRESSURE AND VACUUM SIDES PORTED (DP)

SMALL OUTLINE PACKAGE DIMENSIONS
SURFACE MOUNT



MPX5050 MPXV5050G SERIES

SMALL OUTLINE PACKAGE DIMENSIONS - CONTINUED
SURFACE MOUNT



MPX5050 MPXV5050G SERIES

How to Reach Us:

Home Page:
www.freescale.com

E-mail:
support@freescale.com

USA/Europe or Locations Not Listed:
Freescale Semiconductor
Technical Information Center, CH370
1300 N. Alma School Road
Chandler, Arizona 85224
+1-800-521-6274 or +1-480-768-2130
support@freescale.com

Europe, Middle East, and Africa:
Freescale Halbleiter Deutschland GmbH
Technical Information Center
Schatzbogen 7
81829 Muenchen, Germany
+44 1296 380 456 (English)
+46 8 52200080 (English)
+49 89 92103 559 (German)
+33 1 69 35 48 48 (French)
support@freescale.com

Japan:
Freescale Semiconductor Japan Ltd.
Technical Information Center
3-20-1, Minami-Azabu, Minato-ku
Tokyo 106-0047, Japan
0120 191014 or +81 3 3440 3569
support.japan@freescale.com

Asia/Pacific:
Freescale Semiconductor Hong Kong Ltd.
Technical Information Center
2 Dai King Street
Tai Po Industrial Estate
Tai Po, N.T., Hong Kong
+800 2666 8080
support.asia@freescale.com

For Literature Requests Only:
Freescale Semiconductor Literature Distribution Center
P.O. Box 5405
Denver, Colorado 80217
1-800-441-2447 or 303-675-2140
Fax: 303-675-2150
LDCForFreescaleSemiconductor@hibbertgroup.com

Information in this document is provided solely to enable system and software implementers to use Freescale Semiconductor products. There are no express or implied copyright licenses granted hereunder to design or fabricate any integrated circuits or integrated circuits based on the information in this document.

Freescale Semiconductor reserves the right to make changes without further notice to any products herein. Freescale Semiconductor makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of its products for any particular purpose, nor does Freescale Semiconductor assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation consequential or incidental damages. "Typical" parameters that may be provided in Freescale Semiconductor data sheets and/or specifications can and do vary in different applications and actual performance may vary over time. All operating parameters, including "Typicals", must be validated for each customer application by customer's technical experts. Freescale Semiconductor does not convey any license under its patent rights nor the rights of others. Freescale Semiconductor products are not designed, intended, or authorized for use as components in systems intended for surgical implant into the body, or other applications intended to support or sustain life, or for any other application in which the failure of the Freescale Semiconductor product could create a situation where personal injury or death may occur. Should Buyer purchase or use Freescale Semiconductor products for any such unintended or unauthorized application, Buyer shall indemnify and hold Freescale Semiconductor and its officers, employees, subsidiaries, affiliates, and distributors harmless against all claims, costs, damages, and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if such claim alleges that Freescale Semiconductor was negligent regarding the design or manufacture of the part.

Freescale™ and the Freescale logo are trademarks of Freescale Semiconductor, Inc.
All other product or service names are the property of their respective owners.
© Freescale Semiconductor, Inc. 2004. All rights reserved.

ANEXO B

Tabela de conversão de unidades – Modificado de INMETRO (2008)

| Unidade | <i>Pa</i> (<i>N/m²</i>) | <i>bar</i> | (*) <i>psi</i> | (*) <i>kgf/cm²</i> | (*) (**) <i>mmHg =</i> <i>Torr</i> | (*) (**) <i>inHg</i> | (*) (***) <i>mH₂O</i> | (*) (***) <i>inH₂O</i> |
|---|---|--------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|--|--------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| <i>1 Pa</i> (<i>N/m²</i>) = | 1 | 1,000000 x 10 ⁻⁵ | 1,450377 x 10 ⁻⁴ | 1,019716 x 10 ⁻⁵ | 7,500627 x 10 ⁻³ | 2,953003 x 10 ⁻⁴ | 1,019716 x 10 ⁻⁴ | 4,014613 x 10 ⁻³ |
| <i>1 bar</i> = | 1,000000 x 10 ⁵ | 1 | 1,450377 x 10 ¹ | 1,019716 | 7,500627 x 10 ² | 2,953003 x 10 ¹ | 1,019716 x 10 ¹ | 4,014613 x 10 ² |
| (*) <i>1 psi</i> = | 6,894757 x 10 ³ | 6,894757 x 10 ⁻² | 1 | 7,030696 x 10 ⁻² | 5,171500 x 10 ¹ | 2,036024 | 7,030696 x 10 ⁻¹ | 2,767990 x 10 |
| (*) <i>1 kgf/cm²</i> = | 9,806650 x 10 ⁴ | 9,806650 x 10 ⁻¹ | 1,422334 x 10 ¹ | 1 | 7,355602 x 10 ² | 2,895906 x 10 ¹ | 1,000000 x 10 ¹ | 3,937008 x 10 ² |
| (*) (**) <i>1 mmHg =</i> | 1,333222 x 10 ² | 1,333222 x 10 ⁻³ | 1,933675 x 10 ⁻² | 1,359508 x 10 ⁻³ | 1 | 3,937008 x 10 ⁻² | 1,359508 x 10 ⁻² | 5,352394 x 10 ⁻¹ |
| (*) (**) <i>1 inHg =</i> | 3,386384 x 10 ³ | 3,386384 x 10 ² | 4,911534 x 10 ⁻¹ | 3,453150 x 10 ⁻² | 2,540000 x 10 ¹ | 1 | 3,453150 x 10 ⁻¹ | 1,359508 x 10 |
| (*) (***) <i>1 mH₂O =</i> | 9,806650 x 10 ³ | 9,806650 x 10 ⁻² | 1,422334 | 1,000000 x 10 ⁻¹ | 7,355602 x 10 ¹ | 2,895906 | 1 | 3,937008 x 10 ¹ |
| (*) (***) <i>1 inH₂O =</i> | 2,490889 x 10 ² | 2,490889 x 10 ⁻³ | 3,612729 x 10 ⁻² | 2,540000 x 10 ⁻³ | 1,868323 | 7,355602 x 10 ⁻² | 2,540000 x 10 ⁻² | 1 |

Observações:

1 – (*) – gravidade normal:

$$g_N = 9,80665 \text{ m/s}^2$$

2 – (**) – massa específica do mercúrio a 0 ° C e submetida a uma pressão barométrica de 101325 Pa:

$$\rho_{Hg} = 1,359508 \times 10^4 \text{ kg/m}^3$$

3 – (***) – massa específica da água a 4 ° C e submetida a uma pressão barométrica de 101325 Pa:

$$\rho_{H_2O} = 1,000000 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$$

ANEXO C

APPLICATION OF WEIGHTED LEAST SQUARES TO CALIBRATE A DIGITAL SYSTEM FOR MEASURING THE RESPIRATORY PRESSURES

José Leonardo Ferreira, Nadja Carvalho Pereira, Marconi de Oliveria Júnior, João Lucas da Silva
Flávio Henrique Vasconcelos, Carlos Julio Tierra-Criollo
Department of Electrical Engineering, UFMG, Av. Antônio Carlos 6627, Belo Horizonte, Brazil
joseleo@cpdee.ufmg.br, carjullo@cpdee.ufmg.br

Raquel Britto, Verónica Franco Parreira
Department of Physiotherapy, UFMG, Av. Antônio Carlos 6627, Belo Horizonte, Brazil

Keywords: Calibration, measurement uncertainty, respiratory pressures measuring, weighted least squares.

Abstract: This article presents the results associated to calibration and evaluation of the measurement uncertainty of a digital respiratory pressures measuring system developed at the Biomedical Engineering Research & Development Laboratory (NEPEB) of the Department of Electrical Engineering – UFMG. The proposed method uses the least squares weighted regression to establish the measurement model and to evaluate the uncertainty. The standard expanded uncertainty estimated by the model was 1.4 kPa.

1 INTRODUCTION

The qualitative and quantitative characterization of the result of a measurement is a demand of metrology organisms, providing knowledge about the reliability, important to quality control of products and services. In Brazil, the National Institute of Metrology, Standardization and Industrial Quality (INMETRO) is the local NMI (national measurement institute) and as such is organism responsible for metrology politics and for establishing criterions and general normalization relative to expression of uncertainty (INMETRO, 2007).

Brazilian Ministry of Health (MS) established the compulsory certification for medical and hospital equipment (MHE), not only attributing conditions for a major credibility of use, but, also causing a huge demand for calibration services in the country. A non-calibrated medical equipment can lead clinic diagnostic errors, wrong therapies and iatrogeny in patients.

Today, regulation of certification process of MHE quality in Brazil is defined by two normative documents: MS and ANVISA (1999) and MIDIC and INMETRO (2006). The former defines the

strategies, while the latter describes the technical details for certification.

A digital system was developed at NEPEB (Silva, 2006) in order to measure the maximum pressures exerted by the muscles of the human respiratory system. It was designed as equipment to be used in diagnostic and therapy and, therefore, must be submitted to metrological evaluation according to the standards of the MS. Thus, the measuring system must be certificated, and this process requires *instrument calibration and the evaluation of the measurement uncertainty*.

The measuring system includes a signal acquisition module for pressure and an analogical to digital signal conversion module that allows the digital data to be acquired using a personal computer (PC) through an USB interface.

2 OBJECTIVES

The signal acquisition module of pressure, denominated manovacuometer, uses two sensors of differential pressure, model MPX5050 by Freescale Semiconductor Inc. (Austin, Texas). The sensor possesses two pressure sides (figure 1) and the measured value corresponds to the differential

APPLICATION OF WEIGHTED LEAST SQUARES TO CALIBRATE A DIGITAL SYSTEM FOR MEASURING THE
RESPIRATORY PRESSURES

pressure taken between the two sides. Nevertheless, it is important to emphasize that pressure in one side (P1) must be always higher than that in the other side (P2).

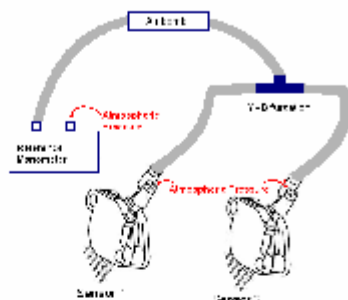


Figure 1: Schematic implementation for prototype calibration.

The purpose of this work is to carry out the calibration of digital manovacuometer developed by NEPEB. The proposed metrological model was built using the weighted least squares method, and, in that way, the measurement uncertainties was evaluated.

3 METHODOLOGY

3.1 Calibration Measurement System Protocol

In order to carry out the calibration of the digital manovacuometer, the protocol describe in (INMETRO, 1997) was used. Two were the motivation for the use of that procedure: (i) the sphygmomanometers with aneroid manometer was one of few clinic equipments that have normalization, regulation and control by INMETRO; (ii) although the normalization is specific for sphygmomanometers with aneroid manometer, this refers to the same type of physical quantity measured by the manovacuometer.

Tests were implemented to get the calibration curves for the two sensors of the developed equipment: i) the maximum indication error test and ii) the hysteresis test.

According to that procedure, the pressure applied to the sensors has to be increased and thereafter decreased. The pressure values (table 1) were applied during approximately five seconds, and an average voltage was evaluated at the output of the manovacuometer. The tests were performed four

times, and a curve of the output voltage *versus* applied pressure, for each sensor, was plotted.

Table 1: Reference pressure values applied to prototype.

| Pressure (kPa) | | |
|----------------|------|------|
| 4.0 | 9.3 | 12.0 |
| 13.3 | 20.0 | 26.7 |
| 33.3 | 40.0 | 46.7 |
| 53.3 | 60.0 | - |

Curve fitting was implemented using the method of weighted least squares (ABNT and INMETRO, 2003; Lira, 2002; Mathioulakis and Belesiotis, 2000; Press *et al.*, 1992). It was chosen to make the fitting for the average rising and fall curves of each sensor. Hence, two curves (rising and fall) were obtained for each sensor.

The instrument which measure the pressure applied to the prototype was a digital commercial manovacuometer (reference manometer) by Ecil (model BB480003) with reported maximum uncertainty of 0.03% ($k=2$), traceable to the SI standard. In figure 1, it is illustrated the schematic for calibration of the prototype, built in our laboratory.

3.2 Evaluating Measuring Uncertainty Protocol

The proposed model to calculate the measuring uncertainty, u_{P_c} , which is associated to the pressure corrected value, was built using the regression fitting obtained with the weighted least squares method. The u_{P_c} and the uncertainty of the reference manovacuometer lead to the evaluating of the standard combined uncertainty $u_c(P)$ and, consequently, to the expanded uncertainty U_p of the measured pressure with the prototype for a test pressure of 26.7 kPa.

4 RESULTS

Figure 2 shows the average calibration curves (rising and fall) for sensor 1 of the manovacuometer under calibration (similar calibration curves to sensor 2).

For fitting implementation, the linear region (up to 53.3kPa) was used. For each calibration curve, the fitting was approximated by the equation:

$$P_c = b + aV_m \quad (1)$$

where P_c corresponds to pressure given a voltage on the output of the manovacuometer (V_m) under calibration.

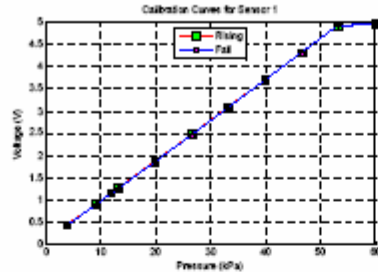


Figure 2: Calibration average curves for sensor 1.

In table 2, are given the reference pressure values associated to measured output voltage values (calibration points) and the respective standard combined uncertainty to rising curve of sensor 2.

Table 2: Reference pressure and output voltage values and associated uncertainties – sensor 2 (rising curve).

| P_r (kPa) | u_{Pr} (kPa) | V_m (V) | u_{Vm} (V) |
|-------------|----------------|-----------|--------------|
| 4.0 | 0.0006 | 0.4578 | 0.0024 |
| 9.3 | 0.0014 | 0.9257 | 0.0066 |
| 12.0 | 0.0018 | 1.1753 | 0.0022 |
| 13.3 | 0.0020 | 1.2909 | 0.0036 |
| 20.0 | 0.0030 | 1.8904 | 0.0035 |
| 26.7 | 0.0040 | 2.4955 | 0.0050 |
| 33.3 | 0.0050 | 3.0974 | 0.0047 |
| 40.0 | 0.0060 | 3.7094 | 0.0045 |
| 46.7 | 0.0070 | 4.3333 | 0.0034 |
| 53.3 | 0.0080 | 4.9410 | 0.0050 |

The uncertainty u_{Pr} associated to reference manovacuometer, was evaluated using the value of the related standard expanded uncertainty, as long as the uncertainty u_{Vm} was estimated based on fluctuation of the repeated readings in each calibration point (Mathioulakis and Belessiotis, 2000), correspondent to type A uncertainty.

The mathematics of linear regression fitting using weighted least squares is described with more details in Lira (2002), Mathioulakis and Belessiotis (2000) and Press *et al.* (1992). The slope a and the intercept b as well as the associated uncertainties u_a e u_b can be obtained from:

$$(K^T \cdot K) \cdot C = K^T \cdot L \quad (2)$$

where, C is a vector whose elements are the fitted coefficients a and b ; and $W=(K^T \cdot L)^{-1}$ is a matrix whose diagonal elements are the variances of a ($w_{2,2}$) and b ($w_{1,1}$). The off-diagonal elements $w_{1,2}=w_{2,1}$ are

the covariances between these parameters. K and L are a matrix and a vector, respectively, whose elements are weighted by pounds that depend on the uncertainties u_{Pr} and u_{Vm} . Solving (2), one obtains the parameters and their uncertainties for each average curve. The results are shown in table 3.

Table 3: Values for the parameters a and b and its uncertainties u_a and u_b .

| | Sensor 1 - Rising | Sensor 1 - Fall | Sensor 2 - Rising | Sensor 2 - Fall |
|--------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| a (kPa/V) | 10.9747 | 10.9797 | 11.0159 | 10.9747 |
| u_a (kPa/V) | 0.0050 | 0.0034 | 0.0086 | 0.0026 |
| b (kPa) | -0.5845 | -0.5280 | -0.9506 | -0.7989 |
| u_b (kPa) | 0.0169 | 0.0079 | 0.0206 | 0.0077 |
| $Cov(b,a)$ (kPa/V) | -7.44×10^{-4} | -2.13×10^{-4} | -1.43×10^{-4} | -1.71×10^{-4} |

Calculation of the uncertainty u_{Pr} associated to calibration points is derived from the law of propagation of uncertainties (ABNT and INMETRO, 2003) and equation (1):

$$u_{Pr} = (a^2 u_a^2 + u_b^2 + V_m^2 u_a^2 + 2V_m Cov(b,a))^{1/2} \quad (3)$$

The standard combined uncertainty, in turn, was obtained by:

$$u_c(P) = u_a^2 + u_b^2 \quad (4)$$

where u_{M} is the uncertainty associated to reference manovacuometer.

The measuring uncertainty was calculated in relation to a calibration point (26.7 kPa) arbitrarily chosen of the average rising curve of the sensor 2. To this point, the average output voltage is $V_m = 2.4955$ V. The uncertainty u_{Vm} is estimated considering the type A uncertainty, u_{V1} , the sensor accuracy, u_{V2} , and the resolution of manovacuometer under calibration, u_{V3} :

$$u_{V1} = \frac{0.0100}{\sqrt{4}} = 0.0050V \quad u_{V2} = \frac{0.1125}{\sqrt{3}} = 0.0650V$$

$$u_{V3} = \frac{0.0001}{\sqrt{3}} = 0.00006V \quad u_{Vm}^2 = u_{V1}^2 + u_{V2}^2 + u_{V3}^2 \Rightarrow u_{Vm} = 0.0652V$$

Taking account these values, those of third column of table 3 and (3) result $u_{Pr} = 0.7183$ kPa. For the reference pressure of 26.7 kPa, the value of u_{M} is equal to 0.0040 kPa. Hence, the standard combined uncertainty is estimated as 0.7 kPa. Finally, the value for the standard expanded uncertainty is

APPLICATION OF WEIGHTED LEAST SQUARES TO CALIBRATE A DIGITAL SYSTEM FOR MEASURING THE
RESPIRATORY PRESSURES

evaluated using the expression of Welch-Satterthwaite (ABNT and INMETRO, 2003).

For the confidence interval of 95.45%, the obtained value for the effective number of degrees is $\nu_{eff} \rightarrow \infty$, which indicates a coverage factor of $k=2$. Therefore, the estimated value for the standard expanded uncertainty is equal to $U_p=1.4$ kPa.

5 DISCUSSIONS

The repeatability of measurement of calibration curves, as discussed in other works of NEPEB, was confirmed here. The maximum value obtained for the type A uncertainty associated to the values of V_m is equal to 0.0066 V.

Calculations of hysteresis were performed considering the fitting curves. The maximum absolute value obtained for hysteresis was equal to 0.1467 kPa for sensor 1 and 0.2957 kPa for sensor 2. These values are much lower than the value established by INMETRO for sphygmomanometers with aneroid manometer. In the same way, when is considered the linear region, it is noticed that the results obtained in maximum indication error test are also inside the tolerance range determined by INMETRO for this equipment (0.4 kPa).

The standard combined and expanded uncertainties estimated for the prototype (for reference pressure of 26.7 kPa) were 0.7 kPa and 1.4 kPa, respectively. The last value is lower than that suggested in INMETRO (2006) for analogical pressures measuring systems, that is, 12 kPa.

6 CONCLUSIONS

The proposed model to calibrate the digital manovacuometer developed at NEPEB uses the weighted least squares. This model indicates that the hysteresis, maximum indication error and uncertainty of the prototype were inside the tolerance range established by INMETRO.

In future works it must be investigated and inserted to the proposed metrological model other possible factors that can be influencing the result prototype uncertainty, as those associated to A/D converter, temperature variation and correlation between the curves parameters and input pressure.

ACKNOWLEDGEMENTS

To FAPEMIG and CNPq for financial support. To CETEL/SENAI/FIEMG represented for Luiz Henrique, Marcus Vinicius and Reiner that lent the laboratory and reference manovacuometer for the measurements. To Rômulo Martini of FHEMIG.

REFERENCES

- ABNT; INMETRO, 2003. *Measurement uncertainty guide* (free translation). ABNT, INMETRO, Rio de Janeiro.
- Brazilian Ministry of Development, Industry and Foreign Commerce (MIDIC); INMETRO, 2006. Establishes the evaluation of conformity for MHE. Portaria N° 86 de 3 de abril de 2006.
- Brazilian Ministry of Health (MS); Brazilian National Health Vigilance Agency (ANVISA), 1999. Establishes the certification for MHE. Resolução N° 444 de 31 de agosto de 1999.
- INMETRO, 2007. Homepage: <http://www.inmetro.gov.br>
- INMETRO, 1997. *Procedure for verification of the sphygmomanometers with aneroid manometer* (free translation). INMETRO, Rio de Janeiro.
- INMETRO, 2006. *Guidelines to carry out the calibration of analogical system measuring pressure* (free translation). INMETRO, Rio de Janeiro.
- Lira, I., 2002. *Evaluating the measurement uncertainty: fundamentals and practical guidance*. Bristol and Philadelphia: IoP.
- Mathioulakis, E.; Belessiotis, V. 2000. *Uncertainty and traceability in calibration by comparison*. Meas. Sci. Technol., 11: 771-775
- Press, W.; Teukolsky, S.; Vetterling, W; Flannery, B. 1992. *Numerical recipes in C: the art of scientific computing*. 2nd ed. Cambridge University Press, Cambridge, 2nd edition.
- Silva, J., 2006. *Development of a digital system for measuring maximum respiratory pressures* (free translation). Monografia (Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

ANEXO D



CALIBRAÇÃO E CÁLCULO DA INCERTEZA PARA UM MEDIDOR DIGITAL DE PRESSÕES RESPIRATORIAS

*José Leonardo Ferreira*¹, *Nadja Carvalho Pereira*¹, *Marconi de Oliveira Júnior*¹, *João Lucas da Silva*¹, *Raquel Brito*²,
*Verônica Franco Parreira*², *Flávio Henrique Vasconcelos*¹, *Carlos Julio Tierra-Criollo*¹

¹ UFMG, Belo Horizonte, Brasil – Núcleo de Estudos e Pesquisa em Engenharia Biomédica (NEPEB) – Departamento de Engenharia Elétrica

² UFMG, Belo Horizonte, Brasil – Departamento de Fisioterapia

Resumo: Neste artigo são mostrados os resultados da calibração e do cálculo da incerteza da medição realizada para um medidor digital de pressões respiratórias desenvolvido pelo Núcleo de Estudos e Pesquisas em Engenharia Biomédica (NEPEB) da Escola de Engenharia da UFMG. O manovacuômetro digital inclui um módulo de aquisição dos sinais de pressão e um módulo de conversão A/D. O equipamento foi submetido a um procedimento de verificação a fim de que fosse realizada sua calibração. Um modelo para o cálculo de sua incerteza da medição foi proposto. Para a pressão de 26,7 kPa, as incertezas padrão combinada e expandida foram estimadas em 0,80 e 1,6 kPa, respectivamente.

Palavras chave: calibração, incerteza de medição, medidor de pressões respiratórias, conversor A/D.

1. INTRODUÇÃO

Quando se relata o resultado de uma grandeza física, é preconizado por organismos nacionais e internacionais ligados ao processo metrológico que seja dada alguma indicação quantitativa da qualidade do resultado, de forma tal que aqueles que o utilizam possam avaliar sua confiabilidade. No Brasil, o Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO) é o órgão executor das políticas de metrologia, e é quem estabelece critérios e regras gerais relacionados à expressão de incertezas associados aos processos de medição [1]. O INMETRO constitui, ainda, o órgão responsável pelo gerenciamento dos sistemas brasileiros de credenciamento de laboratório de calibração e de ensaios e de organismos de certificação (produtos, sistemas de qualidade e pessoal) e inspeção [2].

O Ministério da Saúde (MS), por força da Portaria 2043, de 12/12/1994, tornou compulsória a certificação dos equipamentos médico-hospitalares (EMH), não apenas atribuindo condições para uma maior credibilidade de seus usos, mas também criando demanda de serviços de calibração [2]. A não calibração de equipamento eletromédico pode conduzir a erro no diagnóstico clínico, terapias errôneas que poderão levar a ocorrência de uma iatrogenia no paciente.

A regulamentação do processo de certificação de qualidade de EMH no Brasil é hoje definida por dois documentos normativos: a resolução n° 444 da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), publicada em agosto de 1999 [3] e o Regulamento de Avaliação da Conformidade para Equipamentos Eletromédicos, anexo da portaria n° 86 do INMETRO, de abril de 2006 [4]. O primeiro define os contornos políticos da certificação, enquanto o segundo descreve os detalhes técnicos que condicionam aquela ação.

O Núcleo de Estudos e Pesquisas em Engenharia Biomédica da Escola de Engenharia da UFMG (NEPEB/UFMG) desenvolveu um sistema de mensuração digital das pressões respiratórias máximas exercidas pelos músculos do sistema respiratório. Por ser um equipamento com finalidades eletromédicas de diagnóstico e tratamento, para que o protótipo desenvolvido possa ser utilizado, futuramente, em nível comercial, torna-se necessária a sua avaliação metrológica conforme a portaria 2043 do MS. Assim, o sistema deve passar por um processo de certificação que envolve, dentre outras exigências, a sua calibração e avaliação da sua incerteza da medição.

Tabela 1. Características do Sensor MPX5050

| Característica | Símbolo | Mínimo | Média | Máximo | Unidade |
|--|-----------|--------|---------|----------|-------------|
| Faixa de variação de pressão | P_{CP} | 0 | - | 50 | kPa |
| Tensão de alimentação | V_V | 4,75 | 5,00 | 5,25 | Vdc |
| Corrente de alimentação | I_o | - | 7,0 | 10,0 | mAdc |
| Offset de pressão mínima (0 to 85 °C) @ $V_V = 5,0$ Volts | V_{off} | 0,088 | 0,20 | 0,313 | Vdc |
| Saída de fundo de escala (0 to 85 °C) @ $V_V = 5,0$ Volts | V_{fso} | 4,587 | 4,70 | 4,813 | Vdc |
| Span de fundo de escala (0 to 85 °C) @ $V_V = 5,0$ Volts | V_{fss} | - | 4,5 | - | Vdc |
| Exatidão | - | - | - | +/- 2,5% | V_{fss} |
| Sensitividade | V/P | - | 90 | - | mV/kPa |
| Tempo de resposta | t_R | - | 1,0 | - | ms |
| Corrente de saída de fundo de escala | I_{of} | - | 0,1 | - | mAdc |
| Tempo de Warm-Up | - | - | 20 | - | ms |
| Estabilidade de offset | - | - | +/- 0,5 | - | % V_{fss} |

1.1. O medidor de pressões digital

A mensuração das pressões respiratórias máximas durante a inspiração (pressão inspiratória máxima – PImax) e durante a expiração (pressão expiratória máxima – PEmax) caracteriza uma importante variável para o diagnóstico funcional dos músculos respiratórios. A medida reflete a força máxima que os músculos do sistema respiratório são capazes de exercer. Com isso, a progressão de doenças neuro-musculares pode ser quantificada. Estas pressões podem ser utilizadas também para avaliação de alterações de força muscular durante o processo de envelhecimento. A eficiência de um tratamento fisioterápico, da mesma maneira, pode ser avaliada com tal mensuração. Além disso, trata-se de uma maneira simples, não-invasiva e reprodutível para a quantização da força dos músculos do sistema respiratório [5]. Tais fatores caracterizam as PImax e PEmax como importantes medidas em estudos e tratamentos do sistema respiratório.

As pressões respiratórias máximas são freqüentemente medidas por um manovacuômetro analógico. Tais manovacuômetros possuem várias limitações como as listadas a seguir: os equipamentos são analógicos e permitem apenas uma mensuração pontual da pressão inspiratória máxima (PImax) e da pressão expiratória máxima (PEmax) e não da curva de pressão exercida pelo sujeito. Possuem um procedimento de calibração complexo por se tratar de um equipamento cuja mensuração é mecânica [6]. Tal procedimento não é acessível aos seus usuários e somente pode ser executado pelo fabricante. A leitura dos valores de PImax e PEmax é dificultada devido ao fato de o sujeito examinado conseguir exercer a pressão máxima durante um pequeno período de tempo. A pessoa que efetua a mensuração deve, portanto, ficar extremamente atenta ao valor indicado, aumentando a subjetividade da medida e erros de leitura. A faixa de mensuração dos manovacuômetros para avaliação de força muscular é pequena (até aproximadamente 300 cm de H₂O) e às vezes insuficiente para certos tipos de indivíduo, por exemplo, atletas.

Em face às dificuldades encontradas pela medição das pressões respiratórias realizada por meio do medidor analógico, o NEPEB/UFG optou por desenvolver um sistema completo de mensuração digital das pressões PEmax e PImax (Manovacuometria) [7]. O sistema inclui o módulo de aquisição dos sinais analógicos de pressão e um módulo de conversão do sinal analógico para digital, permitindo que os dados digitalizados sejam adquiridos por qualquer microcomputador IBM compatível através de sua interface USB, amplamente disseminada.

1.2. Características do medidor desenvolvido

O módulo de aquisição dos sinais analógicos de pressão, denominado manovacuômetro, utiliza dois sensores de pressão diferencial (um para PImax e outro para PEmax), modelo MPX5050 do fabricante Freescale Semiconductor Inc. (Austin, Texas). Algumas características desse sensor podem ser encontradas na Tabela 1. O sensor possui duas tomadas de pressão (Figura 1) e o valor medido corresponde à pressão diferencial entre essas duas tomadas. É importante salientar, todavia, que a pressão em uma das tomadas (P1) deve ser sempre maior que na segunda (P2).

O sensor de pressão MPX5050 é piezorresistivo; ou seja, a pressão aplicada gera uma variação na resistência do elemento sensível (*strain-gauge*) que possibilita uma mudança na tensão de saída. O *strain-gauge* é implantado ionicamente em um diafragma de silicone. Ele é integralmente composto também de silicone monolítico. Isso permite que não haja efeitos da temperatura pelas diferentes expansões térmicas do diafragma e do *strain-gauge*. Todavia, existe uma compensação de temperatura no sensor que se deve aos seus outros elementos. Essa compensação permite a utilização do sensor em aplicações com variação de temperatura de 0 a 85°C. Uma vez submetido a diferentes pressões ($P1 > P2$), o diafragma se distende e, como consequência, o *strain-gauge* muda seu valor resistivo gerando uma variação de tensão. É utilizado apenas um *strain-gauge*, o que elimina a necessidade de pareamento entre mais elementos sensíveis ou de calibração quando é utilizada uma ponte de Wheatstone. Além disso, o *offset* dependente apenas de

quão alinhada está a tensão transversa. O sinal produzido no elemento sensível é posteriormente amplificado. Isso possibilita que a faixa de tensão de saída seja condicionada a aproximadamente 0,2 a 5V. Tal característica dispensa uma posterior amplificação externa.

As características do sensor utilizado satisfazem os requisitos estipulados para o sistema: fundo de escala mínimo de 400 cm de H₂O. Como consta em [8], a faixa de variação do fluxo respiratório varia de 0 a 40 Hz. Assim, a frequência mínima de amostragem deve ser maior que 80 Hz (teorema de Nyquist).

1.3. Conversão A/D do sinal – módulo USB

Para a conversão analógica/digital (A/D) do sinal de tensão proveniente do medidor de pressão, utilizou-se o microcontrolador PIC18F4550 da Microchip [9]. Este PIC possui um conversor A/D de 13 canais, 10 bits efetivos e emula o protocolo de comunicação RS232 através da porta USB [10, 11]. No projeto desenvolvido, para aquisição de sinais da pressão pulmonar são utilizados dois canais, um para inspiração e outro para expiração. A frequência de amostragem é de 500 Hz. Após ser digitalizado, o sinal é transmitido ao computador através da porta USB e é, então mostrado na tela do micro por meio de uma interface gráfica.

2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho consiste em realizar a calibração do manovacuômetro digital e construir um modelo metrológico por meio do qual se possa calcular a incerteza de medição do equipamento, avaliando-se, assim a sua confiabilidade.

3. MÉTODO

3.1. Protocolo para calibração do medidor

Procedeu-se à calibração do manovacuômetro digital utilizando-se o protocolo do "Procedimento de Verificação de Esfigmomanômetros do Tipo Aneróide" do INMETRO [12]. Duas foram as motivações para o emprego de tal procedimento: (i) os esfigmomanômetros do tipo aneróide constituem um dos poucos equipamentos clínicos que possuem normalização, regulamentação e controle por parte do INMETRO; (ii) apesar daquela normalização ser especificada para os esfigmomanômetros do tipo aneróide, estes medidores mensuram o mesmo tipo de grandeza que o vacuomanômetro.

Foram realizados dois ensaios para que se calibrasse o equipamento desenvolvido: o ensaio para determinação do erro máximo de indicação e o ensaio de histerese.

De acordo com o procedimento de verificação, devem ser aplicados valores crescentes e decrescentes de pressão ao medidor. Onze valores de pressão foram aplicados (Tabela 2). Na saída do manovacuômetro, registraram-

Tabela 2. Valores de pressão aplicados ao medidor

| Pressão (kPa) | | |
|---------------|------|------|
| 4,0 | 9,3 | 12,0 |
| 13,3 | 20,0 | 26,7 |
| 33,3 | 40,0 | 46,7 |
| 53,3 | 60,0 | - |

se durante aproximadamente cinco segundos, os valores da tensão (e o respectivo valor médio) para cada valor de pressão aplicado. Os ensaios foram realizados quatro vezes, levantando-se assim quatro curvas de tensão de saída pela pressão aplicada.

O instrumento utilizado para gerar e medir a pressão aplicada ao protótipo foi um outro manovacuômetro digital (manômetro de referência) da marca Ecil, cuja incerteza de medição expandida é igual a $\pm 0,03\%$, com fator de abrangência $k=2$ e rastreabilidade a um padrão de referência certificado pelo INMETRO. A Figura 1 ilustra o esquema da montagem implementada em laboratório para calibração do protótipo.

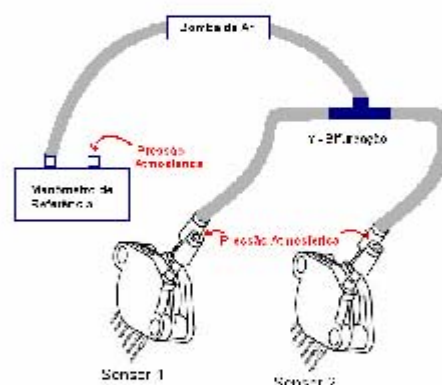


Fig. 1. Esquema da montagem implementada para realização da calibração do protótipo

3.1. Protocolo para cálculo da incerteza de medição

O modelo estabelecido para se calcular o valor da incerteza da medição foi construído com base no Guia para Expressão da Incerteza da Medição do INMETRO [1]. Nesse sentido, foram obtidas as incertezas padrão do Tipo A e B e, em seguida, calculadas as incertezas padrão combinada e expandida.

4. RESULTADOS

As curvas de calibração para os sensores 1 e 2 do manovacuômetro desenvolvido mostraram linearidade até 53,3 kPa (figuras 2 e 3).

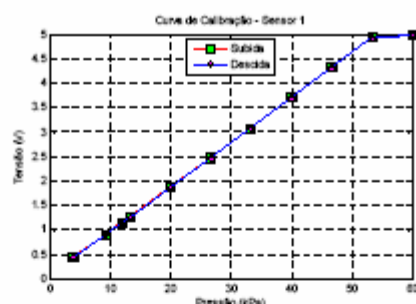


Fig. 2. Uma das quatro curvas de calibração obtidas para o sensor 1

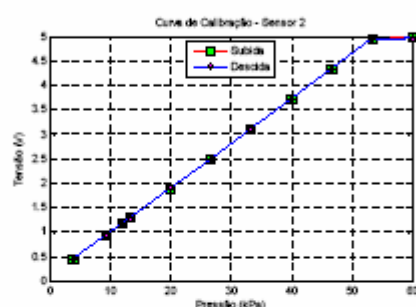


Fig. 3. Uma das quatro curvas de calibração obtidas para o sensor 2

Para o cálculo da incerteza de medição do sistema desenvolvido, inicialmente procurou-se estabelecer uma relação funcional f que relacionasse o mensurando Y , que no caso é a pressão medida pelo sistema, com N outras grandezas de entrada X_1, X_2, \dots, X_N , conforme sugerido em [1]:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (1)$$

Pela inspeção do *datasheet* do sensor de pressão [13] encontra-se a seguinte expressão que relaciona o valor da pressão com a tensão medida na saída do manovacuômetro desenvolvido:

$$V_S = V_P(P \times 0,018 + 0,04) \quad (2)$$

onde V_S é a tensão de saída do sensor; V_P é a tensão de alimentação do sensor; e P é a pressão aplicada ou medida pelo sensor. De (2) obtém-se:

$$P = \frac{500(V_S - 0,04V_P)}{9V_P} \quad (3)$$

Portanto, essa expressão permite calcular o valor da pressão a ser mensurada pelo protótipo com base na tensão medida em sua saída. Quando se considera a incerteza de medição correspondente ao erro do manovacuômetro de referência, ΔP , encontra-se a relação funcional f :

$$P = \frac{500(V_S - 0,04V_P)}{9V_P} + \Delta P \quad (4)$$

A incerteza de medição foi calculada em relação a um ponto específico, escolhido arbitrariamente, das quatro curvas da calibração, região ascendente (subida), do sensor 2, correspondentes a pressão de 26,7 kPa. A média de tensão para esses quatro pontos ($n=4$) é $V_m = 2,4955$ V, com desvio padrão $u_V = 0,0100$ V.

A incerteza do Tipo A corresponde à variabilidade da medição da tensão lida na saída do medidor – u_{V_m} , cuja estimativa está associada ao desvio padrão da média das leituras e é calculada por:

$$u_{V_m} = \frac{u_V}{\sqrt{N}} = \frac{0,0100}{\sqrt{4}} = 0,0050V$$

Com efeito, a Incerteza do Tipo A = 0,0050 V.

Para estimativa da incerteza do Tipo B são observados os seguintes fatores de variabilidade: (i) exatidão do valor lido da tensão – u_R , relacionada a grandezas de influência como temperatura, linearidade e à própria pressão, conforme informado no *datasheet* (aqui, optou-se por utilizar o valor associado a 2,5 vezes V_{FS} , que corresponde ao valor máximo atribuído a essa contribuição, segundo o fabricante, para a faixa de variação de temperatura entre 0 e 85°C); (ii) estabilidade de *offset* (deriva) – u_D , (relacionada a 0,5 vezes V_{FS}); (iii) variabilidade da fonte de alimentação – u_{FA} (foi considerada, neste caso, a fonte de alimentação do computador que foi usada para alimentar o sensor e cuja variabilidade média estimada é de 0,1 V). Um outro fator de variabilidade relevado aqui para o cálculo da incerteza do tipo B é aquele ligado à resolução de leitura do instrumento, que no caso do protótipo é de 0,0001V, mencionado aqui como u_R . As distribuições de probabilidade para os fatores (i), (iii) e aquela relacionada a u_R foram consideradas como sendo uniformes e, portanto:

$$u_R = \frac{0,1125}{\sqrt{3}} = 0,0650V$$

$$u_{FA} = \frac{0,1}{\sqrt{3}} = 0,0577V$$

$$u_R = \frac{0,0001}{\sqrt{3}} = 0,00006V$$

O valor de u_D foi inferido conforme indicado na Tabela 1, como sendo igual 0,0225 V.

Estes quatro últimos valores mais a incerteza de medição associada ao manovacuômetro de referência ($u_M = 0,03\%/2$ da pressão medida, que é igual a 0,0040 kPa quando a pressão de referência é igual a 26,7 kPa) constituem a Incerteza do Tipo B do modelo proposto.

Tomando-se as derivadas parciais de (4), pelas grandezas de entrada (assumindo-se independência estatística, ou seja, decorrelação entre elas), encontra-se a incerteza padrão combinada como:

$$u_p^2(P) = \left(\frac{\partial P}{\partial V_s}\right)^2 u_s^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial V_p}\right)^2 u_p^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial \Delta P}\right)^2 u_{\Delta P}^2 \quad (5)$$

onde

$$u_s^2 = u_{V_m}^2 + u_k^2 + u_h^2 \Rightarrow u_s = 0,0652V$$

$$u_p^2 = u_{V_m}^2 + u_k^2 + u_h^2 \Rightarrow u_p = 0,0620V \text{ e } u_{\Delta P} = u_{M_1} = u_{M_2} = 0,0040kPa$$

$$\frac{\partial P}{\partial V_s} = \frac{500}{9V_p} = 11,11 \frac{kPa}{V}, \quad \frac{\partial P}{\partial V_p} = -\frac{500V_s}{9V_p^2} = -5,546 \frac{kPa}{V} \text{ e}$$

$$\frac{\partial P}{\partial \Delta P} = 1$$

O valor de V_p utilizado no cálculo de $u_p(P)$ é o valor médio de alimentação da fonte, igual a 5 V. Igualmente, o valor médio é usado para a grandeza $V_s = V_m = 2,4955$ V.

A incerteza padrão combinada é estimada, então, como sendo $u_c(P) = 0,80$ kPa.

A incerteza padrão expandida foi calculada considerando-se um intervalo com nível de confiança igual a 95,45%. A fórmula de Welch-Satterthwaite [1], foi utilizada para o cálculo dos graus de liberdade efetivos v_{eff} .

$$v_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{v_i}} \quad (6)$$

Os graus de liberdade associados a u_{V_m} , u_k , u_{M_1} e u_{M_2} foram considerados como ∞ . Para u_{V_s} , $v = n-1 = 4-1 = 3$, e, para $u_{\Delta P}$, o número de graus de liberdade foi estimado com sendo também ∞ . Assim:

$$v_{eff} = \frac{(0,80)^4}{\frac{(0,0652)^4}{3}} = 6799,17 \rightarrow \infty$$

Para o intervalo de confiança de 95,45%, o valor encontrado para v_{eff} indica um fator de abrangência de $k=2$.

Finalmente, calculando-se a incerteza padrão expandida, $U = k \times u_c(P) = 2 \times 0,80$ kPa = 1,6 kPa.

5. DISCUSSÃO

As curvas de calibração dos sensores do vacuomanômetro digital desenvolvido apresentam linearidade até 53,3 kPa e mostraram alta repetitividade de medição nos quatro ensaios realizados.

O valor máximo encontrado para a histerese, em valor absoluto, nos quatro ensaios foi de 0,0190 V para o sensor 1 e de 0,0187 V para o sensor 2. A avaliação de conformidade do sensor [5], utilizando-se o valor para a sensibilidade (Tabela 1) de 90 mV/kPa para o cálculo da pressão medida pelo protótipo, revela que os valores encontrados para histerese são muito menores dos preconizados pelo INMETRO para os esfigmomanômetros do tipo aneróide.

Uma inspeção visual da curva *tensão x pressão* no *datasheet* do sensor revela algumas diferenças em relação às curvas de calibração levantadas neste trabalho. Isso sugere ser necessária uma avaliação da maneira utilizada para conversão da tensão medida para a pressão mensurada pelo protótipo, que foi implementada utilizando-se o valor considerado para a sensibilidade de 90 mV/kPa. Em trabalhos futuros, verificar-se-á a existência de uma expressão que represente melhor a relação entre aquelas grandezas e cujos parâmetros sejam extraídos das próprias retas de calibração, por exemplo, utilizando-se o método dos mínimos quadrados. Tais ações possivelmente poderão minimizar os eventuais erros de conversão mencionados. Outro detalhe que merece ser destacado é que o procedimento de calibração utilizado é específico para esfigmomanômetros do tipo aneróide, o que pode introduzir algum tipo de discrepância nos resultados ao se analisar medidores de pressão similares ao aqui estudado.

Do mesmo modo como discutido acima, a relação funcional f estabelecida neste trabalho (4) pode não estar representando adequadamente o mensurando em função das *grandezas de entrada* aqui consideradas, o que deverá ser investigado. Conseqüentemente, esse fato pode estar comprometendo o modelo proposto aqui para o cálculo da incerteza de medição. Mas, mesmo que isso seja confirmado, o valor de incerteza padrão expandida encontrado para o protótipo é bem inferior àquele sugerido em [6] para os medidores de pressão analógicos, ou seja, 12 kPa.

Alguns pontos também devem ser levados em consideração: nesse modelo não foram incluídas outras fontes de incerteza como aquelas associadas ao conversor A/D e ao fato da possível correlação entre as grandezas de entrada. Finalmente, outras suposições aqui consideradas poderão ser mais profundamente analisadas, como o melhor valor para a variabilidade da fonte de alimentação utilizada para alimentação do sensor e uma melhor avaliação de quanto a temperatura influencia para a variabilidade de medição do protótipo.

6. CONCLUSÃO

A calibração do vacuomanômetro digital desenvolvido pelo NEPEB/UFMG implementada neste trabalho permitiu o levantamento de curvas que relacionam a tensão medida pela pressão aplicada aos sensores do protótipo. Entretanto, por meio da inspeção visual das curvas levantadas e sua comparação com aquela apresentada *datasheet* do equipamento, percebem-se diferenças entre elas. A construção de um novo modelo poderá ser útil para comprovar se essas diferenças comprometem, de alguma forma, a verificação de conformidade apresentada em [12], utilizada neste trabalho.

Por meio do modelo proposto, foram calculadas as incertezas padrão combinada e expandida para o equipamento, cujos valores foram 0,80 e 1,6 kPa, respectivamente, para uma pressão de referência de 26,7

kPa. Esses valores são bastante inferiores aos estabelecidos pelo INMETRO para medidores de pressão analógicos de acordo com [6]. Entretanto, o modelo proposto para a relação funcional f baseado nas expressões (2) e (3), utilizada no cálculo da incerteza de medição, deverá também ser substituído por outros modelos, em trabalhos futuros, a fim de avaliar sua qualidade para o cálculo da incerteza do protótipo.

AGRADECIMENTOS

Ao pessoal do CETEL /SENAI/FIEMG, nas pessoas de Luiz Henrique, Marcus Vinicius e Reiner que gentilmente cederam o laboratório e o manovacuômetro de referência para que as medições pudessem ser realizadas, e a Rômulo Martini, da FHEMIG, pelas informações prestadas.

REFERÊNCIAS

- [1] INMETRO, SBM, *Guia para expressão da incerteza de medição*. ABNT, Rio de Janeiro, 1998. 120p
- [2] CORRÊA, A.B., *Confiabilidade metrological do setor de saúde no Brasil*. 2001. 144f. Dissertação (Mestrado em Metrologia para a Qualidade Industrial). Programa de Pós-Graduação em Metrologia para a Qualidade Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- [3] MINISTÉRIO DA SAÚDE. AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA, Dispõe sobre a certificação de EHM. Resolução N° 444 de 31 de agosto de 1999.
- [4] MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA E COMÉRCIO EXTERIOR. INMETRO, Dispõe sobre a avaliação da conformidade para equipamentos eletromédicos. Portaria N° 86 de 3 de abril de 2006.
- [5] BLACK, L.; HYATT, R. *Maximal respiratory pressures: normal values and relationship to age and sex*. Am. Rev. Resp. Dis., v. 99: 696-702, 1969.
- [6] INMETRO, *Orientações para a realização de calibração de medidores analógicos de pressão*. Documento de caráter informativo. INMETRO, Rio de Janeiro, 2006. 13p
- [7] SILVA, J. *Desenvolvimento de um sistema digital de medição das pressões respiratórias máximas*. 2006. 59f. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- [8] WEBSTER, John G.; CLARK, John W. *Medical instrumentation: application and design*. 3rd ed. New York: Wiley, 1998. 691 p.
- [9] PIC18FUSB, *About Microchip USB PIC (PIC18F2550, PIC18F4550...)*. Disponível em: <<http://pic18fusb.online.fr/wiki/wikka.php?wakka=WikiHome>>. Acesso em: 01 mai. 2007.
- [10] MICROCHIP, *Migrating Applications to USB from RS-232 UART with Minimal Impact on PC Software*. Disponível em: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00956b.pdf>>. Acesso em: 01 mai. 2007.
- [11] MICROCHIP, *Emulating RS-232 over USB with PIC18F4550 - Microchip Technology Inc*. Disponível em: <http://techtrain.microchip.com/webseminars/documents/EmulatingRS-232overUSB_121004.pdf>. Acesso em: 01 mai. 2007.
- [12] INMETRO, *Procedimento de verificação de esfigmomanômetros do tipo aneróide*. INMETRO, Rio de Janeiro, 1997. 10p
- [13] FREESCALE, *Sensor data book*. Disponível em: <www.freescale.com>. Acesso em: 01 mai. 2007.