

APRESENTAÇÃO DAS PLANILHAS DE INCERTEZA DE TODOS OS SERVIÇOS DE CALIBRAÇÃO REALIZADOS PELO LABORATÓRIO DE PRESSÃO DO INMETRO

Paulo R. G. Couto - prcouth@inmetro.gov.br
Túlio P. Franklin - tpfranklin@inmetro.gov.br
Jackson da S. Oliveira – jsoliveira@inmetro.gov.br
Leonardo R. Cinelli – lrcinelli@inmetro.gov.br

INMETRO, Laboratório de Pressão

Av. Nossa Senhora das Graças 50 – Xerém - Duque de Caxias – RJ – CEP 25250-020 - Brasil

Resumo. *O Laboratório de Pressão do INMETRO realiza as calibrações de :manômetros capacitivos, medidores do tipo pirani, balanças de pressão, barômetros, altímetros, manômetros de coluna líquida , transdutores de pressão etc. As estimativas da incerteza de todas estas calibrações são efetuadas de acordo com o ISO GUM 95 (International Organization for Standardization , Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, Geneva, 1993, revised and reprinted in 1995).*

O objetivo deste trabalho é apresentar as componentes de incerteza que integram a incerteza expandida de medição de todas as calibrações realizadas no Laboratório de Pressão do INMETRO.

Palavras-chave: *Calibração, Planilha de incerteza, Pressão*

1. INTRODUÇÃO

" TEOREMA DAS INCERTEZAS"

"Sempre há o que aprender...Ouvindo...Vivendo ...e sobretudo Trabalhando.

Mas só se aprende, quem se dispõe rever suas CERTEZAS".

Darcy Ribeiro

O laboratório de pressão do INMETRO realiza calibrações de medidores de pressão, médio e alto vácuo que abrangem a faixa de escala compreendida entre $2,7 \times 10^{-6}$ Pa a 250 MPa. As calibrações são realizadas por padrões fundamentais e relativos de pressão.

Nas calibrações em alto vácuo dependendo da faixa de escala são utilizados os padrões segundo a "Tabela 1".

Tabela 1. Quadro descritivo dos equipamentos de medição de vácuo

Faixa de Escala	Equipamento	Incerteza Máxima
2,7 E -6 Pa a 8,3 E -3 Pa	Sistema Medidor Iônico	6,4 %
1,0 E -4 Pa a 2,0 Pa	Sistema Medidor SRG-II	0,4 %
1,1 E-1 Pa a 133,32 Pa	Sistema Medidor Capacitivo 1 torr	0,9 %
1,129 Pa a 1333,22 Pa	Sistema Medidor Capacitivo 10 torr	0,6 %
91,5 Pa a 133,32 kPa	Sistema Medidor Capacitivo 1000 torr	0,7 %

* As incertezas declaradas na “Tabela 1” são para 95% de confiança e coeficiente de abrangência k=2.

** As incertezas máximas declaradas na “Tabela 1” são as utilizadas nas faixas que são aconselhadas pelo instituto que efetuou a calibração dos padrões.

Na faixa de escala que vai de 5 kPa até 110 kPa as calibrações são realizadas por barômetros de mercúrio cuja a incerteza é 0,01% (5 Pa).

Os medidores de pressão (Transdutores de pressão, Manômetros de Coluna líquida , balanças de pressão etc) são calibrados por padrões que operam com fluido gasoso ou hidráulico. Dependendo do fluido utilizado e da faixa de escala os sistemas de referência com as suas respectivas incertezas estão descritos na “Tabela 2”.

Tabela 2. Quadro descritivo dos sistemas de medição de balanças de pressão

Fluído	Faixa de escala	Sistema	Incerteza máxima
gás	1,4 kPa a 7 MPa	RUSKA	96 ppm
gás	0,1 MPa a 20 MPa	Desgranges et Huot	54 ppm
óleo	0,1 MPa a 250 MPa	Desgranges et Huot	176 ppm

* As incertezas declaradas na “Tabela 2” são para 95% de confiança e coeficiente de abrangência k=2.

As calibrações dos medidores de alto vácuo são realizadas por intermédio de um sistema MKS VGCS-200 “Figura 1”.



Figura 1. Sistema VGCS-200

Calibrações de barômetros e altímetros são efetuadas através da utilização de uma câmara barométrica “Figura 2”.

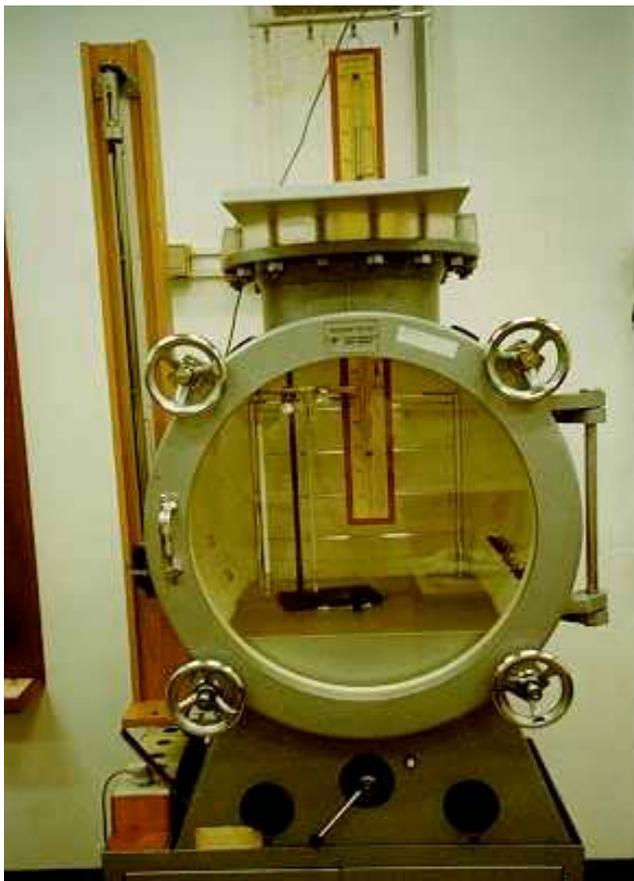


Figura 2. Calibração na Câmara barométrica Figura 3. Calibração de uma Balança de pressão

A calibração de balanças de pressão segue o esquema descrito na “Figura 3”.

2. APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

Na a estimativa da incerteza de medição de todas as calibrações realizadas o laboratório segue a recomendação do ISO GUM 95.

2.2 Calibração de medidores de alto e médio vácuo

As planilhas da expressão da incerteza das calibrações de medidores de alto e médio vácuo são exemplificadas na “Tabela 3”.

Tabela 3. Planilha da incerteza para a calibração de medidores de médio e alto vácuo

Fontes de Incerteza	Valor (Pa)	Distribuição	Divisor	Coef. de Sensib.	Incerteza (Pa)	Graus de liberdade
repetição das leituras do padrão no ponto	0,1	normal	$\sqrt{5}$	1	0,045	4
desvio padrão das leituras médias no ponto	5,4	normal	$\sqrt{4}$	1	2,7	3
certificado de calibração do padrão	4	normal	2	1	2	∞
resolução do instrumento	0,1	retangular	$\sqrt{3}$	1	0,058	∞
Incerteza Combinada	-	normal		-	3,36	7
Incerteza Expandida	-	normal k = 2,43 95%	-	-	8,2	-

2.3. Calibração de barômetro de mercúrio

A “Equação 1” expressa uma das formas para cálculo da pressão medida por um barômetro de mercúrio

$$P_{abs} = g \cdot l_a \left[1 - \frac{\gamma t - \alpha (t - t_B)}{1 + \gamma t} \right] \quad (1)$$

onde:

P_{abs} = pressão medida pelo barômetro de mercúrio

g = aceleração da gravidade local

l_a = leitura correspondente à altura da coluna de mercúrio em uma escala graduada em mbar, torr ou mm

γ = coeficiente de dilatação volumétrica do mercúrio

α = coeficiente de dilatação linear da escala
 t = temperatura da escala e do mercúrio
 t_b = temperatura de referência das divisões da escala

Tabela 4. Planilha das incertezas para a calibração de barômetros de mercúrio (810mmHg)

Fontes de Incerteza	Valor	Distribuição	Divisor	Coeficiente de sensibilidade	incerteza (Pa)	Grau de liberdade
Gravidade local	1 E-7m/s ²	Retangular	$\sqrt{3}$	$1,10 \times 10^4$ kgm ⁻³ m	*	∞
Repetitividade	1,3 E-4m	Normal	1	$1,33 \times 10^5$ kgm ⁻³ ms ⁻²	13	5
Resolução	5 E-5m	Triangular	$\sqrt{6}$		2,7	∞
Coef. Dilat.	1,6 E-5m	Retangular	$\sqrt{3}$		1,2	∞
Term. Escala	8,9 E-7m	Retangular	$\sqrt{3}$		*	∞
Massa Esp. Hg	0,01 kg/m ³	Retangular	$\sqrt{3}$	7,94 ms ⁻² m	*	∞
Coef. Dilat. Vol. Hg	2,71 E-2 kg/m ³	Retangular	$\sqrt{3}$		0,1	∞
Temperatura do Hg	2,46 E-1 kg/m ³	Retangular	$\sqrt{3}$		1,1	∞
Pressão Referência	10 Pa	Normal	2	1	5,4	∞
Incerteza Combinada	-	Normal	-	-	14	12
Incerteza Expandida	-	Normal k = 2,65 95,45%	-	-	37	-

* a contribuição de incerteza desta fonte foi considerada desprezível.

2.4. Calibração de manômetro de coluna líquida

A “Equação 2” expressa uma das formas para cálculo da pressão medida por um manômetro de coluna líquida de mercúrio do tipo U.

$$P = g\Delta H\rho_{Hg}(p_0, 0^\circ C) \left[1 - \frac{\gamma t - \alpha(t - t_b)}{1 + \gamma t} \right] - g \frac{1}{2} \Delta H\rho_{gás}(p_{abs}, t) \quad (2)$$

onde:

P = pressão medida pelo manômetro de coluna

g = aceleração da gravidade local

ΔH = diferença de altura entre os dois meniscos do fluido

$\rho_{Hg(p_0, 0^\circ C)}$ = massa específica média do mercúrio a pressão p_0 e a $0^\circ C$

γ = coeficiente de dilatação volumétrica do mercúrio

t = temperatura da escala e da coluna de mercúrio

α = coeficiente de dilatação linear da escala

t_b = temperatura de referência das divisões da escala

$\rho_{gás(Pabs,t)}$ = massa específica média do gás utilizado na medição da pressão e da temperatura ambiente.

Tabela 5. Planilha das incertezas para a calibração de manômetros de coluna líquida

Fontes de Incerteza	Valor	Distribuição	Divisor	Coeficiente de sensibilidade	incerteza (Pa)	Grau de liberdade
Gravidade local	1 E-7m/s ²	Retangular	$\sqrt{3}$	$1,10 \times 10^4$ kgm ⁻³ m	*	∞
Repetitividade	1,3 E-4m	Normal	1	$1,33 \times 10^5$ kgm ⁻³ ms ⁻²	17	5
Resolução	2,5 E-4m	Triangular	$\sqrt{6}$		14	∞
Coef. Dilat.	1,6 E-5m	Retangular	$\sqrt{3}$		1,2	∞
Term. Temp. Escala	8,9 E-7m	Retangular	$\sqrt{3}$		*	∞
Massa Esp. Hg	0,01 kg/m ³	Retangular	$\sqrt{3}$	7,94 ms ⁻² m	*	∞
Coef. Dilat. Vol. Hg	2,71 E-2 kg/m ³	Retangular	$\sqrt{3}$		0,1	∞
Temperatura do Hg	2,46 E-1 kg/m ³	Retangular	$\sqrt{3}$		1,1	∞
Pressão Referência	10,7 Pa	Normal	2	1	5,4	∞
Gravidade Local	1 E-7 m/s ²	Retangular	$\sqrt{3}$	0,5kg . m ⁻³ . m 11kg m ⁻³ m . s ⁻² 3,9 m . s ⁻² . m	*	∞
Repetitividade	1,3 E-4 m	Normal	1		*	5
Massa Esp. gás	1 E-3 kg/m ³	Retangular	$\sqrt{3}$		*	∞
Incerteza Combinada	-	Normal	-	-	23	12
Incerteza Expandida	-	Normal k = 2,18 95%	-	-	50	-

* a contribuição de incerteza desta fonte foi considerada desprezível.

2.5. Calibração de barômetros e manômetros analógicos/digitais

Tabela 6. Planilha das incertezas para a calibração de barômetros, manômetros e vacuômetros analógicos/digitais

Fontes de Incerteza	Valor (kPa)	Distribuição	Divisor	Coef. de sensibilidade	incerteza (kPa)	Grau de liberdade
repetição das leituras do instrumento no ponto	4	normal	$\sqrt{4}$	1	2	3
certificado de calibração do padrão	1	normal	2	1	0,5	∞
resolução do instrumento	10	retangular	$\sqrt{3}^*$	1	5,8	∞
Incerteza Combinada	-	normal		-	6,2	>100
Incerteza Expandida	-	normal k=2 95,45%	-	-	12	>100

*instrumento digital

2.5. Calibração de balanças de pressão

Para a estimativa da incerteza de medição da calibração de uma balança de pressão é utilizada a “Equação 3”.

$$P = \frac{\sum m (1 - \rho_a / \rho_m) g_n + \sigma c}{A_{0,20} [1 + (\alpha_c + \alpha_p)(t - 20)] [1 + \lambda p_n]} \pm \rho gh \quad (3)$$

onde:

P = pressão medida pela balança de pressão

$\sum m$ = somatório das massas atuantes sobre o pistão

ρ_a = massa específica do ar ambiente

ρ_m = massa específica do material das massas

g_n = aceleração da gravidade normal

σ = tensão superficial do fluido manométrico

c = comprimento da circunferência do pistão

$A_{0,20}$ = área do conjunto pistão-cilindro

α_c = coeficiente de dilatação do cilindro

α_p = coeficiente de dilatação do pistão

t = temperatura do conjunto pistão-cilindro

p_n = pressão nominal medida

ρ = massa específica do fluido manométrico

g = aceleração da gravidade local

h = desnível entre as bases dos pistões da balança em calibração e a de referência

Tabela 7. Planilha das incertezas para calibração de balanças de pressão

Fontes de Incerteza	Valor	Distribuição	Divisor	Coefficiente de sensibilidade	Incerteza (Pa)	Grau de liberdade
Massa Padrão	1,5E-5 kg	Normal	2	1,96E5 ms ⁻² m ⁻²	2,9	∞
Repet. Massa	5,1E-5 kg	Normal	1		10	60
Balança	1,0E-5 kg	Retangular	√3		2	∞
Mas. Esp. Ar	3,8E-4 kg	Retangular	√3		74	∞
Mas. Esp. Mat.	5,7E-7 kg	Retangular	√3		0,1	∞
Tensão Superf.	5,0E-1 Pa	Retangular	√3	1	0,29	∞
Raio Pistão	2,5E-1 Pa	Retangular	√3	1	0,14	∞
Repet. Área	1,5E-8 m ²	Normal	1	1,20E11 kg.ms ⁻² m ⁻²	1765	9
Coef. α _p , α _c	1,0E-10m ²	Retangular	√3		7	∞
Temperat.	1,4E-10m ²	Retangular	√3		9,7	∞
Coef. Defor.	1,8E-10m ²	Normal	1		21,6	9
Pressão Ref.	324 Pa	Normal	2	1	162	∞
Massa Esp. do fluido	1 kg/m ³	Retangular	√3	9,32E-1ms ⁻² m	0,5	∞
Grav. Local	1 E-7 m/s ²	Normal	1	6,11E5 kgm ⁻²	0,1	∞
Grav. Normal	1 E-5 m/s ²	Retangular	√3	8,29E1kgm ⁻³ m	*	∞
Desnível entre as bases	5 E-4 m	Retangular	√3	8,54E3 kgm ⁻³ ms ⁻²	2,5	∞
Incerteza Combinada	-	Normal	-	-	1774	9
Incerteza Expandida	-	Normal k = 2,26 95%	-	-	4009	9

CONCLUSÕES

Observa-se pelas incertezas declaradas na "Tabela 1" que o sistema de vácuo do INMETRO apresenta-se bastante estável. Consequentemente fica evidenciado que a incerteza do tipo A a qual é a mais significativa na planilha é referente ao instrumento em calibração.

A planilha de incertezas apresentada como exemplo para calibração de barômetro de coluna de mercúrio evidencia que a componente mais significativa é aquela referente a repetitividade a qual representa 86% da incerteza total.

Para o caso de calibração de manômetros de coluna líquida de mercúrio as fontes de incerteza mais significativas são a repetitividade e a resolução do instrumento as quais em conjunto equívalem a 92% da incerteza combinada.

Por ser a componente de incerteza referente a repetitividade bastante significativa na incerteza total tanto em barômetros de mercúrio quanto em manômetros de coluna líquida conseqüentemente se faz necessário um controle rígido das condições ambientais na calibração destes tipos de instrumentos.

Especificamente no exemplo apresentado de calibração de uma balança de pressão que opera em baixa pressão a componente de incerteza mais significativa é aquela referente à variação da área ($A_{0,20}$) do instrumento, a qual equívale a aproximadamente 99,4% da incerteza combinada. Porém para esse tipo de instrumento operando a pressões elevadas um maior cuidado deve ser dedicado a componente referente ao coeficiente de deformação, porque neste caso a sua respectiva incerteza se torna um fator significativo ou até o mais relevante da incerteza combinada. Adicionalmente, quando se calibra instrumento de um alto nível de exatidão em pressões elevadas as componentes mais significativas são: as referentes ao coeficiente de deformação e a variação da área do conjunto pistão cilindro e a incerteza do padrão a utilizada na calibração.

REFERÊNCIAS

International Organization for Standardization , 1993, revisado e reeditado em 1995, Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, Geneva,
Dadson, Robert S., 1982, The Pressure Balance Theory na Practice, National Physical Laboratory
Physikalish Technische Bundesanstalt, 1983, PTB Testing Instructions Liquid Manometers

PRESENTATION OF THE UNCERTAINTY TABLES OF ALL CALIBRATION SERVICES THAT ARE MADE BY THE PRESSURE LABORATORY OF INMETRO

Abstract. *The Pressure Laboratory of INMETRO makes calibrations in capacitance manometers, pirani sensors, pressure balances, barometers, altimeters, liquid manometers, presure transducers etc. All the uncertainties of these calibrations are estimated according to ISO GUM 95 (International Organization for Standardization , Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, Geneva, 1993, revised and reprinted in 1995). The objective of this work is to show the uncertainty compounds that intergrate the measurement expanded uncertainty of all calibration made in the Pressure Laboratory of INMETRO.*

Key words: *Calibration, Uncertainty table, Pressure*