

I CIMMEC
1º CONGRESSO INTERNACIONAL DE METROLOGIA MECÂNICA
DE 8 A 10 DE SETEMBRO DE 2008
Rio de Janeiro, Brasil.

**COMPARAÇÃO DE PRESSÃO FAIXA DE 20 kPa a 10 MPa
UTILIZANDO-SE MANÔMETROS DIGITAIS DE PISTÃO**

Paulo R G Couto¹, Luiz H. Paraguassu¹, Walmir S. Silva¹, Rodrigo S. Soares¹, Luiz Pedro de Araújo²,

¹ Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial - INMETRO
Av. Nossa Senhora das Graças, 50 - CEP 25250-020 - Xerém - Duque de Caxias - Rio de Janeiro - Brasil
prcouth@inmetro.gov.br, paraguassu@inmetro.gov.br, wssilva@inmetro.gov.br, rsoares@inmetro.gov.br

² Universidade Federal do Rio Grande do Norte- UFRN
lpedro@dem.ufrn.br

Resumo: São apresentadas as análises da comparação entre os resultados obtidos pelo Laboratório de Pressão do Inmetro e da DH-Budenberg, fabricante dos manômetros digitais de pistão utilizados na comparação, na faixa de 20 kPa a 10 MPa. Os manômetros digitais de pistão pertencem a Universidade Federal do Rio Grande do Norte, e apresentam os seguintes coeficientes de conversão (K_n): 0,1 bar/kg; 2 bar/kg e 20 bar/kg. As estimativas das incertezas de medição, foram obtidas pelas metodologias de cálculo do ISO GUM 95 (Clássica e Kragten) e do Método de Monte Carlo. Adicionalmente, foi realizada a análise dos fatores preponderantes na incerteza combinada dos manômetros digitais de pistão. Os resultados obtidos pelos dois laboratórios foram analisados através do erro normalizado (E_n) e também por intermédio dos intervalos de incerteza estabelecidos a partir dos resultados obtidos pelo Inmetro.

Palavras chave: Manômetro digital de pistão, Calibração, Incerteza de medição, ISO GUM 95, método Monte Carlo.

1. INTRODUÇÃO

O princípio de medição do manômetro digital de pistão está baseado na associação de um conjunto pistão-cilindro, similar àqueles utilizados nas balanças de pressão, com um transdutor de força. O transdutor mede e interpola continuamente a força produzida, a partir da geração de pressão no topo do conjunto pistão cilindro do manômetro digital de pistão. O presente trabalho analisa a comparação entre os resultados obtidos pelo Lapre-Inmetro na calibração de manômetros digitais de pistão, com os valores declarados nos certificados de calibração emitidos pela DH-Budenberg, fabricante dos instrumentos.

O ISO GUM 95 objetiva de maneira geral, a harmonização internacional da metodologia do cálculo da estimativa da incerteza de um resultado de medição [5]. A metodologia recomendada no ISO GUM 95 tem limitações como: linearização do modelo, suposição da normalidade do mensurando e cálculo dos graus de liberdade efetivos [5,6]. Objetivando superar estas limitações do guia, o modelamento pelo método de Monte Carlo [5,6] pode ser aplicado também para a avaliação da incerteza de medição. Desta forma, o artigo também apresenta a comparação dos

valores de incerteza obtidos pelos métodos do ISO GUM 95 e de Monte Carlo.

2. OBJETIVO

O artigo apresenta a comparação dos resultados das calibrações dos três manômetros digitais de pistão, realizadas pelos laboratórios de pressão do Inmetro e da DH-Budenberg. Os três instrumentos operam nas seguintes faixas de pressão: 20 kPa a 50 kPa, 100 kPa a 1 MPa e 1 MPa a 10 MPa. São comparados os valores das estimativas da incerteza de medição, obtidos pelas metodologias de cálculo do ISO GUM 95 (Clássica e Kragten) e o modelamento de Monte Carlo. Adicionalmente, são analisados os fatores que preponderam no valor da incerteza combinada nos três medidores. A compatibilidade entre os resultados obtidos pelos laboratórios do Inmetro e da DH-Budenberg é analisada através do erro normalizado (E_n). A compatibilidade dos resultados também é avaliada por intermédio dos intervalos de incerteza estabelecidos para cada instrumento, a partir dos resultados obtidos pelo Inmetro.

3. METODOLOGIA

A metodologia da calibração dos quatro manômetros digitais de pistão seguiu o método “crossfloating”, conforme a figura 1.

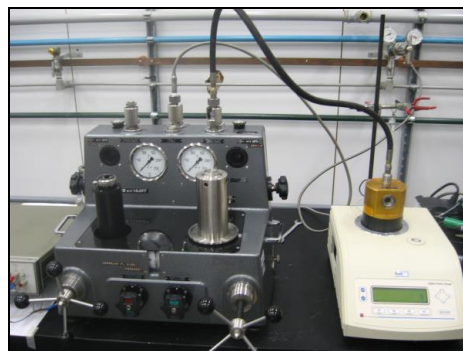


Figura 1: Método “crossfloating”

Cada manômetro digital de pistão foi calibrado em dez pontos nominais de pressão, nos sentidos ascendente e descendente, de 10% a 100% da faixa de escala de medição dos instrumentos. Para cada valor nominal de pressão da calibração dos instrumentos, foram determinados os valores dos coeficientes de conversão (K_n) conforme equação 1.

$$K_n = P_{Ref} \cdot \frac{g_n}{g_l} \cdot \frac{N_k}{N} \cdot \left[+ (\alpha_p + \alpha_c) \cdot (t - 20) \cdot \left[\frac{\rho_{an} - \rho_m}{\rho_a - \rho_m} \right] \right]$$

Equação 1: Cálculo do coeficiente de conversão (K_n)

Onde:

g_n e g_l = aceleração da gravidade (m/s^2) normal e local, respectivamente;

t , α_c e α_p = temperatura ($^{\circ}C$), coeficiente de dilatação térmica ($^{\circ}C^{-1}$) do cilindro e do pistão, respectivamente;

ρ_a , ρ_{an} e ρ_m = massa específica (kg/m^3) do ar durante a realização da calibração, massa específica normal do ar ($1,2 kg/m^3$) e massa específica do material das massas ($7920 kg/m^3$), respectivamente;

N_k e N = sensibilidade do manômetro (100000 dígitos/kg) e número de dígitos, respectivamente.

A partir do K_n médio da calibração de cada sistema, foram então calculados os valores de pressão indicados (P_{ind}) por cada medidor conforme equação 2.

$$P_{ind} = K_n \cdot \frac{g_l}{g_n} \cdot \frac{N}{N_k} \cdot \left[- (\alpha_p + \alpha_c) \cdot (t - 20) \cdot \left[\frac{\rho_a - \rho_m}{\rho_{an} - \rho_m} \right] \right]$$

Equação 2: Cálculo da Pressão Indicada (P_{ind})

Com os valores da pressão indicada por cada medidor e a respectiva pressão de referência, foram determinados os erros em função da faixa de medição de cada manômetro digital de pistão.

Posteriormente, foram estimadas as incertezas de medição da pressão indicada pelos manômetros digitais de pistão (P_{ind}). A incerteza de medição foi determinada através das Metodologias Clássica e de Kragten, previstas no ISO GUM 95. Foram identificados graficamente as fontes preponderantes de incerteza na calibração dos três medidores.

A metodologia computacional de Monte Carlo com 150.000 iterações foi aplicada também, para a estimativa da incerteza de medição na calibração dos três medidores.

Os resultados de medição obtidos pelo laboratório de pressão do Inmetro foram comparados com os resultados declarados pela DH-Budenberg. A análise da comparação foi através do erro normalizado (E_n), e também por intermédio dos intervalos de incerteza estabelecidos a partir dos resultados obtidos pelo Inmetro.

4. RESULTADOS

Conforme a metodologia do cálculo da incerteza descrita, a figura 2 apresenta o diagrama causa-efeito, onde são identificadas todas as fontes de incertezas na medição da pressão indicada (P_{ind}) por um manômetro digital de pistão.

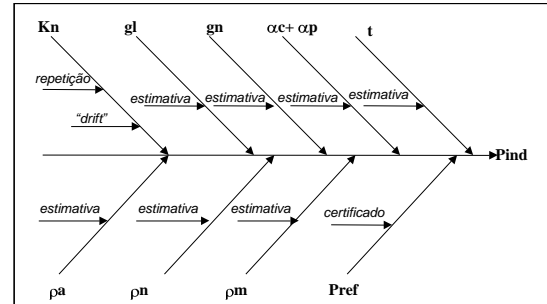


Figura 2: Diagrama causa-efeito da pressão indicada

A partir dos diagramas “causa-efeito” da pressão indicada dos três manômetros digitais de pistão, foram avaliadas a partir de 10% a 100% da faixa de escala de cada medidor, os valores de todas as fontes de incertezas dos três sistemas. Na figura 3 é apresentado o modelo de gráfico referente ao balanço das incertezas da pressão indicada por um manômetro digital de pistão.

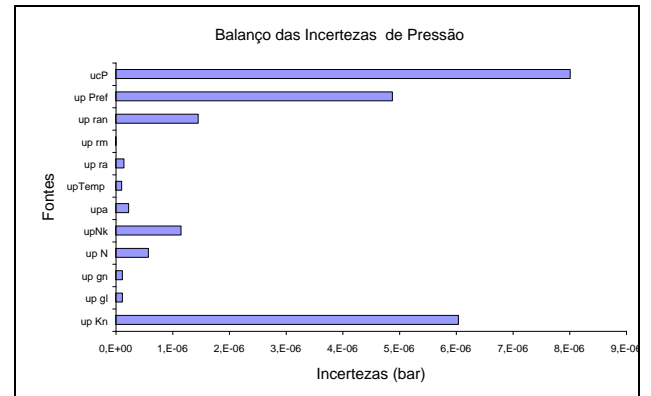


Figura 3 : Modelo de Gráfico elaborado para o balanço das incertezas de medição de pressão de um manômetro digital de pistão.

No limite superior da faixa de escala dos sistemas, foi onde ocorreu a maior incerteza. A tabela 1 apresenta na forma percentual, as duas fontes cujos valores de incerteza mais impactam na incerteza combinada dos três sistemas. Estas fontes são os coeficientes de conversão (K_n) de cada manômetro e também aquela referente aos respectivos padrões de referência utilizados nas calibrações.

Faixa (bar)	Impacto (%) na Incerteza $u_c(P)$	
	K_n	P_{ref}
0 a 0,5	57	37
0 a 10	49	38
0 a 100	2	84

Tabela 1: Impacto das incertezas referentes ao K_n e à pressão de referência na incerteza combinada de pressão indicada pelos três sistemas.

A tabela 2 apresenta os valores das estimativas das incertezas combinadas (u_c), obtidos pelas metodologias do ISO GUM 95 (Clássico e Kragten) e o método computacional de Monte Carlo. Os valores da tabela, são para os limites inferior e superior das faixas de escala dos três manômetros digitais de pistão.

Faixa(bar)	Pn(bar)	uc(bar)		
		Clássico	Kragten	Monte Carlo
0 a 0,5	0.2	8.0E-06	8.0E-06	7.9E-06
	0.5	2.0E-05	2.0E-05	2.0E-05
0 a 10	1	1.2E-05	1.2E-05	1.1E-05
	10	1.1E-04	1.1E-04	1.0E-04
0 a 100	10	2.5E-05	2.5E-05	2.5E-05
	100	2.3E-04	2.3E-04	2.3E-04

Tabela 2: Valores das estimativas das incertezas combinadas (u_c) obtidos pelos métodos do ISO GUM 95 e de Monte – Carlo.

As tabelas 3A, 3B e 3C apresentam os valores dos erros normalizados (E_n) da comparação entre os resultados, obtidos pelo Inmetro e a DH-Budenberg para toda a faixa de escala dos três sistemas.

0 a 0,5 bar		0 a 10 bar		0 a 100 bar	
bar	E_n	bar	E_n	bar	E_n
0.20	0.83	1.0	0.58	10.0	0.05
0.23	0.86	2.0	0.62	20.0	0.07
0.26	0.89	3.0	0.64	30.0	0.08
0.30	0.91	4.0	0.64	40.0	0.08
0.33	0.92	5.0	0.65	50.0	0.09
0.36	0.94	6.0	0.65	60.0	0.09
0.40	0.95	7.0	0.65	70.0	0.09
0.43	0.96	8.0	0.65	80.0	0.09
0.46	0.97	9.0	0.65	90.0	0.09
0.50	0.97	10.0	0.65	100.0	0.09

Tabelas 3A, 3B e 3C- Valores dos erros normalizados (E_n) da comparação entre Inmetro e a DH-Budenberg, para os três sistemas

Nas figuras 4A, 4B e 4C são representados os erros declarados nos certificados emitidos pela DH-Budenberg, em conjunto com aqueles calculados a partir dos resultados obtidos no Inmetro. Os respectivos intervalos de incertezas são representados também nas figuras, em linhas verticais para os três sistemas de medição.

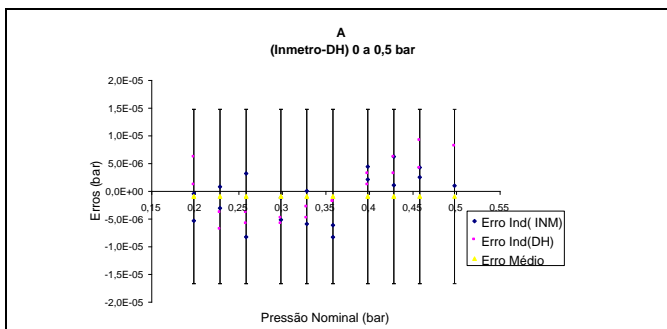


Figura 4 A- Erros de medição a partir dos resultados do Inmetro e da DH-Budenberg do sistema cujo $K_n= 0,1\text{bar/kg}$, com as respectivas incertezas em linhas verticais.

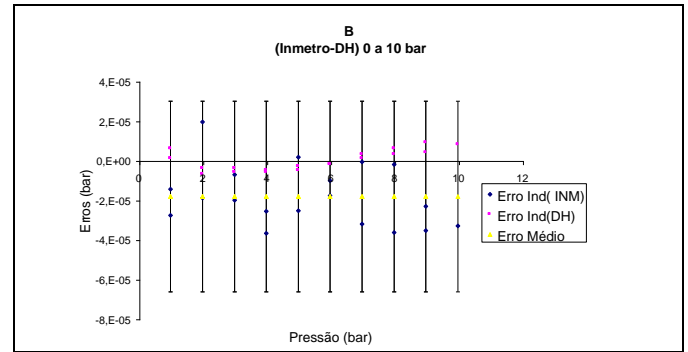


Figura 4 B- Erros de medição a partir dos resultados do Inmetro e da DH-Budenberg do sistema cujo $K_n=2\text{ bar/kg}$, com as respectivas incertezas em linhas verticais.

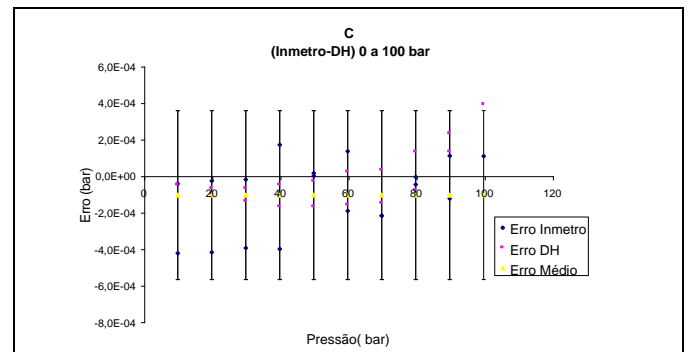


Figura 4 C- Erros de medição a partir dos resultados do Inmetro e da DH-Budenberg do sistema cujo $K_n= 20\text{ bar/kg}$, com as respectivas incertezas em linhas verticais.

5. DISCUSSÃO

A partir dos modelos de gráfico dos balanços das incertezas de medição dos três sistemas analisados (vide figura 3) e também dos valores apresentados na tabela 1, observa-se que : para os sistemas de K_n iguais a $0,1\text{bar/kg}$ e 2 bar/kg , a combinação das fontes de incerteza referentes ao K_n e à do respectivo padrão utilizado na calibração, definem o valor da incerteza dos dois sistemas. Porém no caso do sistema cujo K_n é 20 bar/kg , a incerteza referente à fonte do padrão utilizado é o fator que mais impacta na incerteza combinada deste sistema, correspondendo a 84% da incerteza combinada.

A tabela 2, mostra para os limites inferior e superior das faixas de escala dos três manômetros digitais de pistão, que não existe diferença entre os valores de estimativa da incerteza obtidos pelos métodos do ISO GUM 95 (Clássico e Kragten) e metodologia computacional de Monte Carlo. Nos limites inferior e superior das faixas de escalas dos instrumentos, foram os pontos que ocorreram a menor e maior incerteza, respectivamente.

Nas tabelas 3A, 3B e 3C, utilizadas para a comparação entre os resultados obtidos pelo Inmetro e a DH-Budenberg, observa-se que os valores dos erros normalizados (E_n) são sempre menores do que “um” em toda a faixa de escala dos instrumentos.

Os gráficos das figuras 4A, 4B e 4C mostram que o erro de medição determinado a partir dos resultados obtidos pelo

Inmetro com seus respectivos intervalos de incerteza dos três sistemas, contém todos os erros declarados pela DH-Budenberg. Os limites dos intervalos foram estabelecidos pelos valores da menor incerteza expandida determinada pelo Inmetro, para cada um dos três sistemas. A tabela 4 apresenta os valores do intervalos de incerteza, em conjunto com as incertezas declaradas pela DH-Budenberg nas pressões mínima e máxima para os três sistemas.

Sistema	0,1 bar/kg	2 bar/kg	20 bar/kg
Intervalo	± 1,5 Pa	± 4,8 Pa	± 46 Pa
U (Pmínima)	1,8 Pa	28 Pa	126 Pa
U (Pmáxima)	3,2 Pa	88 Pa	540 Pa

Tabela 4: Valores dos intervalos incerteza determinados a partir das calibrações realizadas pelo Inmetro, em conjunto com as incertezas declaradas pela DH-Budenberg para os três sistemas.

6. CONCLUSÕES

Para os sistemas de Kn iguais a 0,1bar/kg e 2 bar/kg a combinação das fontes de incerteza referentes ao Kn e ao padrão de referência utilizado na respectiva calibração, definiram praticamente o valor da incerteza dos dois sistemas.

No caso do sistema cujo Kn é 20 bar/kg, a incerteza correspondente à fonte padrão de referência utilizado na respectiva calibração, foi fator preponderante em relação a todos os outros no cálculo da incerteza combinada deste sistema, correspondendo a 84% da incerteza combinada.

Apesar das limitações do ISO GUM 95, não foi evidenciada diferença significativa entre os valores obtidos de estimativa de incerteza pelas metodologias citadas no Guia (Clássica e Kragten) e o método computacional de Monte Carlo, na calibração dos três manômetros digitais de pistão.

Os resultados obtidos das calibrações dos três sistemas pelo Inmetro e a DH-Budenberg são compatíveis, visto que, os valores calculados dos erros normalizados (E_n) para as três comparações de resultados, são menores do que “um”.

A compatibilidade entre os valores dos erros obtidos pelo Inmetro dos manômetros digitais de pressão, e aqueles declarados pela DH-Budenberg é da ordem de: ± 1,5 Pa, ± 4,8 Pa e ± 46 Pa, para os sistemas cujos coeficientes de conversão (K_n) são 0,1 bar/kg; 2 bar/kg e 20 bar/kg, respectivamente.

A compatibilidade das comparações é ratificada, porque as incertezas declaradas pelo fabricante dos instrumentos nas pressões mínimas e máximas (vide tabela 4) são sempre maiores do que o intervalo de incerteza determinado pelo Inmetro na calibração dos três sistemas.

REFERÊNCIAS

1. Legras, J.-C., *La Mesure des Pressions Statiques*, Monographies du Bureau National de Metrologie, Editions CHIRON- ISBN 2-7027-0384-4, Paris, 1986.
2. ISO GUM 95, *Guia para a Expressão da Incerteza de Medição*, 3ª edição brasileira em língua portuguesa, ABNT e INMETRO, Rio de Janeiro, 2003.
3. *Versão Brasileira do Documento de Referência EA-4/02 - Expressão da Incerteza de Medição na*

Calibração, INMETRO e ABNT e SBM, Rio de Janeiro, 1999.

4. *Versão Brasileira do Documento de Referência EA-4/02-S1, Suplemento 1 ao EA-4/02 - Expressão da Incerteza de Medição na Calibração - Exemplos*, INMETRO e SBM, Rio de Janeiro, 1999.
5. Couto, P. R. G., *Estimativa da Incerteza da Massa Específica da Gasolina pelo ISO GUM 95 e Método de Monte Carlo e seu Impacto na Transferência de Custódia*, Dissertação de Mestrado, Escola de Química/UFRJ, Rio de Janeiro, 2006.
6. Herrador, A. M. e González, G. A., *Evaluation of Measurement Uncertainty in Analytical Assays by Means of Monte Carlo Simulation*, Talanta, vol. 64, 2004, pp. 415-422..