

*Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
Diretoria de Metrologia Científica e Industrial - Dimci
Divisão de Metrologia Mecânica - Dimec*

CALIBRAÇÃO DE INSTRUMENTO DE MEDIÇÃO MOSTRADOR DIGITAL DE PRESSÃO (manômetro, vacuômetro e manovacuômetro)

DIMEC/gc-08/v.00

Guia de Calibração

Mai 2010



**CALIBRAÇÃO DE INSTRUMENTO DE MEDIÇÃO MOSTRADOR
DIGITAL DE PRESSÃO**
(manômetro, vacuômetro e manovacuômetro)

Paulo Roberto Guimarães Couto - prcouto@inmetro.gov.br
Luiz Henrique Paraguassu de Oliveira - paraguassu@inmetro.gov.br
Jackson da Silva Oliveira - jsoliveira@inmetro.gov.br
Paulo Lyra Simões Ferreira - plferreira@inmetro.gov.br

Conteúdo

1	Introdução	3
2	A grandeza pressão	3
3	Abrangência e campo de aplicação	3
4	Definições	3
5	Medidores de pressão	4
6	Propriedades dos dispositivos de medição	8
7	Padrão de Referência e Instrumentos para a calibração	10
8	Condições ambientais	11
9	Calibração de medidor mostrador digital de pressão	11
10	Incerteza de Medição	12
11	Certificado de Calibração	14
12	Referências	14
	Anexo 1 - Incerteza da Curva de Calibração de um padrão	16
	Anexo 2 – Modelo de Certificado de Calibração	19
	Anexo 3 – Tabela de Conversão de Unidades	21

1 INTRODUÇÃO

As medidas de pressão têm um extensivo e importante papel nos processos industriais. Existem diversas aplicações da grandeza pressão; por exemplo, nas indústrias de petróleo, petroquímica, meteorológica, aeroespacial, aviação, etc. A confiabilidade destas medições está associada às questões de comércio, qualidade, saúde, segurança, etc.

2 A GRANDEZA PRESSÃO

Pressão é uma grandeza derivada do Sistema Internacional de Grandezas. Numa forma geral, a pressão é resultante do efeito da força do impacto das moléculas de um fluido, líquido ou gasoso, nas paredes de um recipiente no qual o fluido está contido. O valor de pressão pode ser calculado na sua forma fundamental pelas equações (1) e (2):

$$P = \frac{m \cdot g}{A} \quad (1)$$

$$P = \rho_f \cdot g \cdot h \quad (2)$$

Onde:

P é a pressão;

m é a massa;

g é a aceleração da gravidade local;

A é a área;

ρ_f é a massa específica do fluido;

h é a altura manométrica do fluido.

3 ABRANGÊNCIA E CAMPO DE APLICAÇÃO

Esta nota técnica aplica-se à calibração dos instrumentos de medição mostradores digitais de pressão (manômetros, vacuômetros e manovacuômetros) utilizando-se como padrão de referência uma balança de pressão ou um padrão adequado de pressão ou vácuo.

4 DEFINIÇÕES

4.1 Pressão

A medição de pressão é sempre realizada a partir de um valor referencial. Dependendo do referencial utilizado, as modalidades de pressão medida são: pressão absoluta, pressão manométrica, vácuo e pressão diferencial.

4.2 Pressão Absoluta

A pressão absoluta (P_{abs}) é a pressão que está acima da pressão “zero absoluto”.

4.3 Pressão Manométrica (Relativa ou Positiva)

A pressão manométrica é um caso especial de medição de pressão diferencial quando a pressão absoluta medida for maior que a pressão atmosférica local. A pressão manométrica avalia o quanto seu valor está acima da pressão atmosférica local.

4.4 Vácuo (Pressão Negativa)

Vácuo é um caso especial de medição de pressão diferencial quando a pressão absoluta medida for menor que a pressão atmosférica local. Vácuo avalia o quanto a pressão está abaixo da pressão atmosférica local.

4.5 Pressão Diferencial

A diferença entre duas pressões p_1 e p_2 é denominada pressão diferencial. Nesta modalidade de pressão o valor da pressão referencial, p_1 ou p_2 , não é a pressão atmosférica local como também a pressão “zero absoluto”

4.6 Unidades

A unidade medição da grandeza pressão deriva das unidades das grandezas de base do Sistema Internacional de Unidades (SI): massa, comprimento e tempo. A unidade de pressão do SI é o pascal (Pa), sendo definida pela relação entre as unidades de força e área (N/m^2). Existem outras unidades de medida de pressão como, por exemplo: bar, psi, mmHg, kgf/cm^2 , etc. Para a conversão de unidades de pressão são utilizadas tabelas, nas quais devem constar as referências que serviram de base para a sua elaboração. Geralmente estas referências são: valor convencional da aceleração da gravidade ($g_N = 9,80665 m/s^2$); massa específica do mercúrio ($\rho_{Hg} = 1,359508 \times 10^4 kg/m^3$; 0 °C; 101325 Pa); massa específica da água ($\rho_{H_2O} = 1,000 \times 10^3 kg/m^3$; 4°C; 101325 Pa). O desconhecimento destas informações poderá acarretar erros da ordem 0,4% e 0,2% na conversão de qualquer unidade quando a pressão é medida a partir da altura da coluna de mercúrio e de água respectivamente. Uma tabela de conversão de unidades seguindo estas recomendações é apresentada no anexo 3.

5 MEDIDORES DE PRESSÃO

Os instrumentos de medição de pressão podem ser classificados em dois grandes grupos: fundamentais e relativos. Os instrumentos fundamentais medem pressão a partir da definição da grandeza. Neste grupo incluem-se o manômetro de coluna líquida e a balança de pressão. Os instrumentos relativos medem a pressão em função de uma propriedade física ou um fenômeno físico. Neste grupo estão compreendidos os manômetros, vacuômetros, manovacuômetros, manômetros digitais de pistão, transdutores/transmissores de pressão, etc.

5.1 Balança de Pressão

A balança de pressão mede a grandeza, a partir do equilíbrio entre as forças provenientes da pressão de um fluido e das massas que agem, respectivamente, na base e no topo de um pistão no interior de um cilindro, conforme seqüência da figura 1.

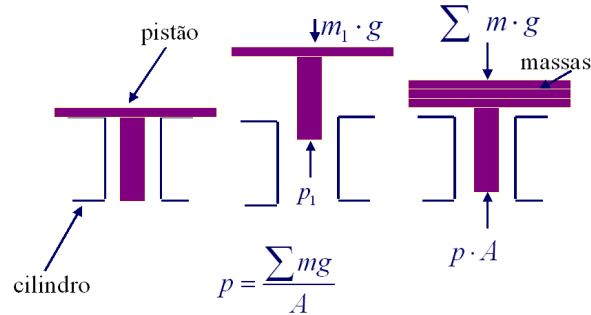


Figura 1 - Princípio de medição da balança de pressão

A equação de medição de pressão por uma balança de pressão é definida pela expressão 3:

$$p = \frac{\left[m_p \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_{mp}} \right) + \sum m \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_m} \right) \right] \cdot g_l + \sigma C}{A_{0,20} [1 + (\alpha_c + \alpha_p) \cdot (\theta - 20)] \cdot (1 + \lambda p_n)} \pm \rho_{fluido} g_l \Delta h \quad (3)$$

Onde:

- p é a pressão medida, em Pa;
- m_p é a massa do pistão, em kg;
- ρ_a é a massa específica do ar, em kg/m³;
- ρ_{mp} é a massa específica do material do pistão, em kg/m³;
- $\sum m$ é o somatório das massas restantes que atuam no topo do pistão, em kg;
- ρ_m é a massa específica do material das massas restantes, em kg/m³;
- g_l é a aceleração devida a gravidade local, em m/s²;
- σ é a tensão superficial do fluido, em N/m;
- C é o comprimento da circunferência do pistão, em m;
- $A_{0,20}$ é a área do conjunto pistão cilindro, em m²;
- $\alpha_c + \alpha_p$ é o coeficiente de dilatação térmica linear do conjunto pistão-cilindro, em °C⁻¹;
- θ é a temperatura no momento da medição, em °C;
- λ é o coeficiente de deformação do conjunto pistão-cilindro, em pressão⁻¹;
- p_n é a pressão nominal da medição, na unidade pressão do coeficiente de deformação;
- ρ_{fluido} é a massa específica do fluido utilizado, em kg/m³;
- Δh é o desnível entre a base do pistão e o ponto onde a pressão será medida, em m.

Na equação 3, o valor de Δh é negativo quando a base do pistão da balança de pressão está abaixo do ponto de medição de pressão, e positivo quando a base situar-se acima do ponto de medição da pressão.

5.2 Barômetro de Coluna de Mercúrio

O barômetro é um medidor de pressão absoluta. A sua construção objetiva que o instrumento realize a medição da pressão atmosférica. A equação de medição de pressão por um barômetro é calculada pela expressão 4:

$$p = \frac{g_l}{g_n} \cdot l \cdot \left[1 - \frac{\gamma \cdot \theta - \alpha \cdot (\theta - \theta_B)}{1 + \gamma \cdot \theta} \right] \quad (4)$$

Onde:

- g é a aceleração local da gravidade, m/s²;
- g_n é a aceleração normal da gravidade (9,80665 m/s²);
- l é a indicação do barômetro, em mmHg ou mbar;
- γ é o coeficiente de dilatação volumétrica do mercúrio ($1,81 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$);
- α é o coef. de dil. térmica linear da escala, ($\alpha_{\text{latão}} = 18,4 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; $\alpha_{\text{aço}} = 11,5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)
- θ é a temperatura no momento da medição da escala e do mercúrio, em $^\circ\text{C}$;
- θ_B é a temperatura de referência da escala, em $^\circ\text{C}$;

5.3 Manômetro de Coluna Líquida

Os manômetros de coluna líquida englobam dois tipos de medidores de pressão, tipo U e de cisterna. Os fluidos utilizados nos manômetros de coluna líquida são geralmente a água e o mercúrio. Com os manômetros de coluna de mercúrio mede-se pressão diferencial, pressão manométrica e pressão absoluta. Com um manômetro de coluna de água pode-se medir pressão diferencial e pressão manométrica, porém devido a pressão de vapor da água ser da ordem de 23 mbar, este tipo não é recomendado para medir pressão absoluta.

A equação geral de medição das modalidades pressão diferencial e manométrica por um manômetro de coluna líquida do tipo U é calculada pela expressão 5:

$$\Delta p = \rho_f g_l \Delta h \quad (5)$$

Onde:

- Δp é a pressão diferencial em Pa;
- g_l é a aceleração local da gravidade em m/s²;
- Δh é o desnível entre os meniscos em m.

Sendo o mercúrio o fluido do manômetro de coluna líquida do tipo U a expressão 5 fica:

$$\Delta p = \rho_{\text{Hg}(P0,0^\circ\text{C})} \cdot (1 + \gamma \cdot \theta) \cdot g_l \cdot \Delta h \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta \theta) \quad (5a)$$

Onde:

- Δp é a pressão diferencial, em Pa;
- g_l é a aceleração local da gravidade, em m/s²;
- Δh é o desnível entre os meniscos em, m.

- γ é o coeficiente de dilatação volumétrico do mercúrio igual a $1,81 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$;
 θ é a temperatura no momento da medição do mercúrio, em $^\circ\text{C}$;
 α é o coef. de dil. térmica linear da escala, ($\alpha_{\text{latão}} = 18,4 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$; $\alpha_{\text{aço}} = 11,5 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$);
 $\Delta\theta$ é a diferença entre as temperatura da escala e de referência, em $^\circ\text{C}$;

5.4 Manômetro Digital de Pistão

Os manômetros digitais de pistão são instrumentos híbridos com propriedades dos medidores fundamentais e relativos. Os manômetros digitais de pistão são compostos de uma base (“dinamômetro”), de um ou mais cabeçotes de medição e acessórios. A base contém um transdutor de força que mede força oriunda da pressão a ser medida, a qual é aplicada no cabeçote no interior do qual tem um conjunto pistão-cilindro. Deste modo o instrumento apresenta uma indicação digital (Número de Incrementos) em função da pressão aplicada. A equação de medição de pressão por um manômetro digital de pistão é definida pela equação 6:

$$p = K_n \cdot \frac{g_l}{g_n} \cdot \frac{N}{N_k} \cdot [1 - (\alpha_p + \alpha_c) \cdot (\theta - 20)] \cdot \left[\frac{\rho_a - \rho_m}{\rho_{an} - \rho_m} \right] \quad (6)$$

Onde:

- p é a pressão medida;
 K_n é o coeficiente de conversão do conjunto pistão cilindro;
 g_l é a aceleração devida a gravidade local, em m/s^2 ;
 g_n é a aceleração da gravidade convencional, em m/s^2 ;
 N é o número de incrementos;
 N_k é a sensibilidade do manômetro;
 $\alpha_c + \alpha_p$ é o coeficiente de dilatação térmica linear do conjunto pistão-cilindro, em $^\circ\text{C}^{-1}$;
 θ é a temperatura no momento da medição, em $^\circ\text{C}$;
 ρ_a é a massa específica do ar durante a medição, em kg/m^3 ;
 ρ_{an} é a massa específica normal do ar, em kg/m^3 ;
 ρ_m é a massa específica do material das massas, em kg/m^3 ;

5.5 Instrumento de Medição Mostrador Digital de Pressão

Nestes tipos de medidores a estimulação mecânica de um sensor causada pela pressão é convertida em um sinal elétrico, o qual é apresentado na forma digital. Este sinal é amplificado e indicado na unidade de uma modalidade de pressão ou em uma grandeza elétrica. O princípio elétrico de medição de um instrumento mostrador digital de pressão pode ser geralmente: resistivo, capacitivo, indutivo e piezoelétrico. Dependendo da modalidade de pressão medida o instrumento mostrador digital de pressão pode ser um manômetro digital, um vacuômetro digital ou um manovacuômetro digital. Quando a indicação do dispositivo de medição é na unidade de uma grandeza elétrica o instrumento é um transdutor/ transmissor de pressão.

6 PROPRIEDADES DOS DISPOSITIVOS DE MEDIÇÃO

A seguir são apresentados alguns conceitos contidos na Portaria INMETRO nº 319, VOCABULÁRIO INTERNACIONAL DE METROLOGIA- Conceitos Fundamentais e Gerais e Termos Associados (VIM 2008).

6.1 Intervalo de Indicações

Conjunto de valores compreendidos entre duas indicações extremas.

6.2 Intervalo Nominal de Indicações

Conjunto de valores compreendidos entre duas indicações extremas arredondadas ou aproximadas, obtido com um posicionamento particular dos controles de um instrumento de medição ou sistema de medição e utilizado para designar este posicionamento.

6.3 Amplitude de Medição

Valor absoluto da diferença entre os valores extremos de um intervalo nominal de indicações.

6.4 Intervalo de Medição

Conjunto de valores de grandeza do mesmo tipo que pode ser medido com dado instrumento de medição ou sistema de medição com incerteza instrumental especificada, sob condições determinadas.

6.5 Escala de um Instrumento de Medição

Parte do instrumento de medição que consiste de um conjunto ordenado de marcas associadas aos valores da pressão.

6.6 Resolução

Menor diferença entre indicações que pode ser significativamente percebida.

6.7 Calibração

Operação que estabelece, numa primeira etapa e sob condições especificadas, uma relação entre os valores e as incertezas de medição fornecidos por padrões e as indicações correspondentes com as incertezas associadas; numa segunda etapa, utiliza esta informação para estabelecer uma relação visando a obtenção de um resultado de medição a partir de uma indicação.

6.8 Curva de Calibração

Expressão da relação entre uma indicação e o valor medido correspondente.

6.9 Erro de Medição

Diferença entre o valor medido e um valor de referência.

6.10 Erro Máximo Admissível

Valor absoluto do extremo do erro de medição, com respeito a um valor de referência conhecido, aceito por especificações ou regulamentos para uma dada medição, instrumento de medição ou sistema de medição. No caso de um medidor mostrador de pressão, o erro máximo admissível é apresentado na forma percentual em relação a amplitude de medição do medidor.

6.11 Repetitividade

A repetitividade de um medidor mostrador de pressão é determinada em um mesmo ponto nominal de pressão, pelo valor absoluto da razão percentual entre a diferença máxima das indicações do instrumento, em um mesmo sentido de aplicação da pressão (ascendente ou descendente), e a amplitude de medição.

6.12 Histerese

A histerese de um medidor mostrador de pressão é determinada num mesmo ponto nominal de pressão, pelo valor absoluto da razão percentual entre a diferença máxima das indicações do instrumento em um dos ciclos (pressão ascendente e pressão descendente), e a amplitude de medição.

6.13 Linearidade

A linearidade de um medidor mostrador de pressão é determinada pelo valor absoluto da razão percentual entre o resíduo máximo e a amplitude de medição. O resíduo para uma dada indicação é definido pela diferença absoluta entre o valor medido e o respectivo valor obtido pela curva de calibração.

6.14 Classe de Exatidão

Classe de instrumentos de medição ou de sistemas de medição que atendem a requisitos metrológicos estabelecidos para manter os erros de medição ou as incertezas de medição instrumentais dentro de limites especificados, sob condições de funcionamento especificadas. As classes de exatidão dos medidores mostradores digitais de acordo ASME B40.100-2005 conforme os erros máximos admissíveis, são apresentadas na Tabela 1.

TABELA 1 – Erros máximos admissíveis das classes de exatidão dos medidores mostradores digitais de pressão

CLASSE DE EXATIDÃO	ERRO MÁXIMO ADMISSÍVEL (%)	REFERÊNCIA
5A	0,05	LIMITE SUPERIOR DO INTERVALO NOMINAL DE INDICAÇÕES
4A	0,1	
3A	0,25	
2A	0,5	
A	1	
B	2	
5AR	0,05	VALOR DE INDICAÇÃO
4AR	0,1	
3AR	0,25	
2AR	0,5	
AR	1	
BR	2	

7 PADRÃO DE REFERÊNCIA E INSTRUMENTOS PARA A CALIBRAÇÃO

Conforme as classes de exatidão dos medidores mostradores digitais de pressão, os padrões utilizados e número de pontos para a calibração devem ser especificados de acordo com a Tabela 2.

TABELA 2 – Padrões utilizados na calibração dos medidores mostradores digitais de pressão conforme as suas classes de exatidão

Instrumento	N.º mínimo de pontos	Condição da calibração	Padrão para calibração do instrumento (*)
Manômetro e vacuômetro digitais	Classes 5A, 5AR, 4A, 4AR, 3A E 3AR 10 pontos de 10% a 100% do limite superior da faixa nominal	2 ciclos (no mínimo)	- Balança de pressão. - Padrão cuja classe de exatidão seja 4 vezes melhor que a do instrumento a ser calibrado.
	Classes 2A E 2AR 10 pontos de 10% a 100% do limite superior da faixa nominal	2 ciclos (no mínimo)	- Balança de pressão. - Padrão cuja classe de exatidão seja 4 vezes melhor que a do instrumento a ser calibrado.
	Classes A, AR, B e BR 5 pontos, preferencialmente de 25% em 25% do limite superior da faixa nominal	2 ciclos (no mínimo)	- Balança de pressão. - Padrão cuja classe de exatidão seja 4 vezes melhor que a do instrumento a ser calibrado.

Adicionalmente ao padrão são utilizados os seguintes instrumentos: *i)* termômetros; *ii)* um medidor de umidade relativa do ar e *iii)* um medidor de pressão atmosférica.

8 CONDIÇÕES AMBIENTAIS

A calibração deve ser realizada após a equalização entre as temperaturas do instrumento a ser calibrado e a do meio ambiente. O instrumento pode ser calibrado no intervalo de temperatura entre 18° C e 28° C mantendo-se estável dentro $\pm 1^\circ$ C. Se a massa específica do ar tem um efeito sobre o resultado da calibração, devem ser registrados os valores da temperatura ambiente, da pressão atmosférica e da umidade relativa do ar.

9 CALIBRAÇÃO DE MEDIDOR MOSTRADOR DIGITAL DE PRESSÃO

A calibração de um medidor mostrador digital de pressão pode ser realizada utilizando-se uma balança de pressão como referência ou um medidor mostrador digital padrão de pressão adequado.

9.1 Preparação da Calibração

9.1.1 Limpeza

Antes da calibração é importante que o instrumento esteja totalmente limpo e isento de impurezas que possam causar algum dano ao padrão, principalmente no caso do padrão de referência utilizado ser uma balança de pressão ou também um manômetro digital de pistão.

9.1.2 Determinação do número de pontos de calibração

O número de pontos na calibração depende da classe de exatidão do instrumento, e pode ser conforme a Tabela 2.

9.1.3 Seleção do padrão a ser utilizado

Os medidores mostradores digitais de pressão de todas as classes devem ser calibrados por uma balança de pressão ou um padrão adequado, desde que o mesmo tenha uma incerteza quatro vezes menor do que a do instrumento a ser calibrado.

9.1.4 Posicionamento do instrumento

Posicionar o instrumento a ser calibrado no sistema de medição de calibração conforme sua posição normal de trabalho.

9.1.5 Procedimento da Calibração

9.1.5.1 Aplicar pressão (para manômetros) ou vácuo (para vacuômetros) máximos no instrumento e permanecer nesta condição por alguns minutos para observar a existência de vazamento.

Nota: No caso de manovacuômetros a solicitação será nos dois limites da escala do instrumento. A passagem do limite máximo de pressão ao de vácuo deverá ser contínua.

9.1.5.2 Aliviar totalmente a pressão (manômetro) ou vácuo (vacuômetro) e permanecer por alguns minutos.

9.1.5.3 Iniciar a calibração com aplicação crescente (carregamento) de pressão ou vácuo, nos pontos determinados da calibração conforme item 9.1.2, até que o instrumento em calibração atinja os valores predeterminados. Registrar em formulário adequado o respectivo valor indicado pelo padrão.

9.1.5.4 Alcançando-se o ponto máximo de calibração predeterminado, aliviar (descarregamento) continuamente a pressão (manômetro) ou vácuo (vacuômetro), efetuando-se os registros dos respectivos valores indicados pelo instrumento e medidos pelo padrão, referentes aos mesmos pontos predeterminados da calibração conforme 9.1.2.

9.1.5.5 Alcançando-se o ponto mínimo de calibração predeterminado, aliviar totalmente a pressão ou vácuo por um breve intervalo de aproximadamente 1 min. Deste modo é finalizado o primeiro ciclo de calibração do instrumento. Após o primeiro ciclo (carregamento e descarregamento), na sequência realizar o segundo e último ciclo da calibração, conforme 9.1.5.3, 9.1.5.4 e 9.1.5.5.

9.1.6 Avaliação da Qualidade da Calibração

Antes da realização de todos os cálculos da calibração, deve-se observar se todos os erros pontuais seguem aproximadamente uma “lei” e estão contidos no intervalo de uma resolução do instrumento calibrado, o qual é representado pelas linhas verticais na figura 6:

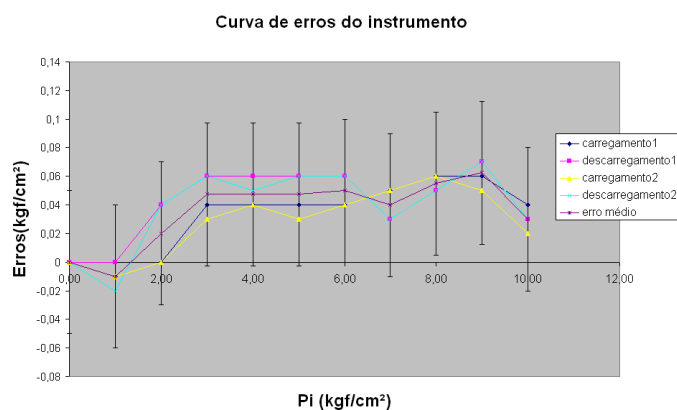


Figura 6– Curva de erros do instrumento calibrado

10 INCERTEZA DE MEDIÇÃO

A incerteza de medição na calibração de um instrumento de medição mostrador digital de pressão é estimada conforme o “JCGM 100:2008 - GUM 1995 with minor corrections - Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement - First edition September 2008”. A metodologia do ISO GUM 2008 pode ser resumida nas seguintes etapas de caráter pontual:

- Definição do mensurando;
- Elaboração do diagrama causa-efeito;
- Estimativas das incertezas das fontes de entrada;
- Cálculo dos coeficientes de sensibilidade;
- Cálculo das componentes de incerteza;
- Combinação das componentes;
- Cálculo dos graus de liberdade efetivos;
- Determinação do fator de abrangência;
- Estimativa da incerteza de medição expandida.

O mensurando em uma calibração é o valor da grandeza que define o erro do instrumento. Deste modo, no caso da calibração de um instrumento de medição mostrador digital de pressão o valor do mensurando é definido pela equação 7.

$$e(p) = VI - Vref \quad (7)$$

Onde:

$e(p)$ é o erro do instrumento;

VI é o valor da grandeza indicado pelo instrumento;

$Vref$ é o valor da grandeza medido pelo padrão.

O valor de referência ($Vref$) pode ser originado de uma balança de pressão, de um manômetro digital de pistão ou qualquer padrão desde que o mesmo tenha uma classe de exatidão cujo erro seja quatro vezes menor do que o instrumento a ser calibrado. No caso do padrão utilizado ser um instrumento de medição mostrador analógico ou digital de pressão, o valor de referência medido ($Vref$) é calculado a partir da sua curva de calibração (Anexo 1). Deste modo considerando-se as observações, o diagrama causa-efeito desta calibração para as duas situações relatadas é apresentado na Figura 7.

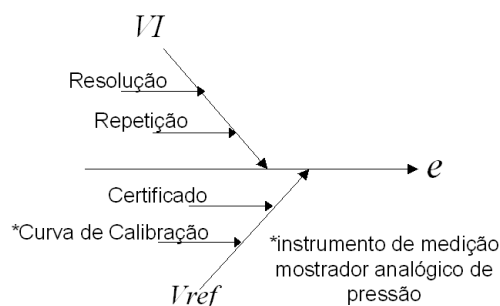


FIGURA 7 - Diagrama causa - efeito da calibração de um Instrumento Indicador de pressão

Conforme o diagrama causa-efeito da Figura 7, a Tabela 3 apresenta um modelo da planilha de incertezas para a calibração de um instrumento mostrador digital de pressão.

TABELA 3 – Modelo da planilha de incerteza da calibração de um instrumento mostrador digital de pressão

Fontes de Incerteza	Valor (unidade)	Distribuição	Divisor	Coef. de Sensibilidade	Incerteza (unidade)	Graus de liberdade (ν_i)
Erros pontuais	s*	normal	\sqrt{n}	1	$u_1 = ***$	$\nu_1 = n - 1$
Resolução do instrumento	a	retangular (triangular)	$** \frac{\sqrt{3}}{(\sqrt{6})}$	1	$u_2 = ***$	∞
Certificado do padrão	$U_{\text{certificado}}$	normal	2	1	$u_3 = ***$	∞
Incerteza da curva de calibração	Anexo 1	normal	1	1	$u_4 = ***$	$\nu_4 = n_t + m - 3$
Incerteza Combinada	-	normal	-	-	$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2}$	****
Incerteza Expandida	-	normal $k \sim 2$ 95,45%	-	-	$U = k \cdot u_c$	****

* desvio padrão dos (n) erros pontuais.

** o ponto de medição não é fixado no instrumento em calibração. A estimativa da incerteza referente à resolução do instrumento não deverá ser melhor do que aquela referente à sua classe de exatidão.

*** é igual a razão do valor pelo divisor.

$$**** \nu_{\text{eff}} = \frac{u_c^4}{\frac{u_1^4}{\nu_1} + \frac{u_4^4}{\nu_4}}$$

n_t é o número total de pontos da curva de calibração do padrão.

m é o número de repetições do valor médio interpolado na curva de calibração do padrão.

11 CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

A elaboração do certificado de calibração de um instrumento (Anexo 2) segue o requisito 5.10 da norma NBR ISO/IEC 17025:2005 e o Vocabulário Internacional de Metrologia - VIM.

12 REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Guia para a Expressão da Incerteza de Medição. ISO GUM 95. Terceira Edição Brasileira Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. Rio de Janeiro :ABNT , INMETRO. Edição Revisada. Agosto de 2003.120p.
- JCGM 100:2008 GUM 1995 with minor corrections Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement-First edition September 2008

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração. Rio de Janeiro: ABNT, 2005. 31p.(ABNT ISO/IEC 17025:2005)
- INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL (INMETRO). Quadro Geral de Unidades de Medida. Resolução do CONMETRO nº 12/1988.Segunda Edição 2000.
- INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL (INMETRO).VOCABULÁRIO INTERNACIONAL DE METROLOGIA - Conceitos Fundamentais e Gerais e Termos Associados 1.ed. Rio de Janeiro, 2008.78p.
- 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.
- 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.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Manômetros com sensor de elemento elástico – Recomendações de fabricação e uso. ABNT, 1998. 19p (ABNT NBR 14105:2008)
- Guideline DKD-R 6-1 - Calibration of Pressure Gauges- Edition 01/2003
- ANSI/ASME-B 40-1 - Gauges Pressure and Vacuum Indicating Dial Type - Elastic Element (1974)
- MASSART, D.L.; VANDEGINSTE, B. M. G.; BUYDENS, L. M. C.; JONG, S.; LEWI, P. J.; SMEYERS-VERBEKE, J. Handbook of Chemometrics and Qualimetrics. Part A. Volume 20A. Elsevier Science B.V. 1997.867p

ANEXO 1

INCERTEZA DA CURVA DE CALIBRAÇÃO DE UM PADRÃO

$$Vref_{calculado} = a + bVI_o$$

Onde:

$Vref_{calculado}$ é o valor de referência calculado pela curva de calibração do padrão;

a é o coeficiente linear da curva de calibração do padrão

b é o coeficiente angular da curva de calibração do padrão

VI_o é o valor indicado pelo padrão

A incerteza dos coeficientes linear e angular da curva de calibração do padrão para um $Vref_{calculado}$ e um respectivo VI_o indicado é definido pela equação (ISO GUM 2008) :

$$u_{a,b}(Vref_{calculado}) = \sqrt{1^2 \cdot s_a^2 + VI_o^2 \cdot s_b^2 + 2 \cdot 1 \cdot VI_o \cdot u_a \cdot u_b \cdot r_{a,b}}$$

Onde:

s_a^2 é a variância do coeficiente linear da curva de calibração do padrão;

s_b^2 é a variância do coeficiente angular da curva de calibração do padrão;

u_a é a incerteza do coeficiente linear da curva de calibração do padrão;

u_b é a incerteza do coeficiente angular da curva de calibração do padrão;

$r_{a,b}$ é o coeficiente de correlação entre a e b .

As variâncias dos coeficientes linear e angular da curva de calibração do padrão e suas respectivas incertezas são determinadas pelas seguintes expressões:

$$s_a^2 = \frac{s^2 \sum VI^2}{D}$$

$$s_b^2 = n_t \cdot \frac{s^2}{D}$$

$$u_a = \sqrt{s_a^2}$$

$$u_b = \sqrt{s_b^2}$$

$$r_{a,b} = -\frac{\sum VI}{\sqrt{n_t \cdot \sum VI^2}}$$

Sendo s^2 e D calculados pelas equações abaixo:

$$s^2 = \frac{\sum (Vref_i - Vref_{calculado\ i})^2}{n_t - 2}$$

$$D = n_t \cdot \sum VI^2 - (\sum VI)^2$$

Onde:

$Vref_i$ é o valor de referência apresentado no certificado de calibração;

$Vref_{calculado\ i}$ é o valor de referência calculado pela curva de calibração para um dado VI .

Segundo Massart e outros a incerteza combinada dos coeficientes linear e angular da curva de calibração do padrão $u_{a,b}(Vref_{calculado})$ para um $Vref_{calculado}$ pode ser calculada também pela seguinte expressão:

$$u_{a,b}(Vref_{calculado}) = s \cdot \sqrt{\frac{1}{n_t} + \frac{(VI_o - \overline{VI})^2}{\sum (VI_i - \overline{VI})^2}}$$

A incerteza da curva de calibração $u_{Vref_{calculado}_i}$ para um determinado VI_o é definido pela equação:

$$u_{Vref_{calculado}} = s \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{n_t} + \frac{(VI_o - \overline{VI})^2}{\sum (VI_i - \overline{VI})^2}} = u_4$$

No caso de ocorrerem repetições de VI_o , a incerteza referente à curva de calibração $u_{Vref_{calculado}_i}$ para a média $\overline{VI_o}$ é definido pela equação:

$$u_{Vref_{calculado}} = s \cdot \sqrt{\frac{1}{m} + \frac{1}{n_t} + \frac{(\overline{VI_o} - \overline{VI})^2}{\sum (VI_i - \overline{VI})^2}} = u_4$$

Sendo:

m é o número de repetições de valor VI_o

Nota: Quando não há repetições, o número dos graus de liberdade efetivos (ν_i) de $u_{Vref_{calculado}_i}$ é igual $n_t - 2$. No caso de ocorrerem repetições o número dos graus de liberdade efetivos (ν_i) de $u_{Vref_{calculado}_i}$ é $n_t + m - 3$.

ANEXO 2

MODELO DE CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

- Cliente
- Endereço
- Identificação do Item (Fabricante/Modelo/Tipo/Número de Série/Código de Identificação)
- Informações Administrativas (Ordem de Serviço/Data da Calibração)
- Laboratório Responsável pela Calibração
- Características do Item (Escala do instrumento /Acessórios)
- Informações Pertinentes à Calibração

Os resultados da calibração são rastreados ao Sistema Internacional de Unidades (SI), por intermédio de padrões metrológicos nacionais. A calibração foi realizada na temperatura ambiente de $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$, umidade $(65 \pm 10) \%$, pressão atmosférica $(100 \pm 0,6) \text{ kPa}$ e um sistema de medição (balança de pressão ou manômetro padrão / vacuômetro padrão / manovacuômetro padrão), onde a gravidade foi previamente determinada. A rastreabilidade dos padrões/grandezas que compõem esse sistema é descrita na Tabela 1:

TABELA 1 - Rastreabilidade dos Padrões/Grandezas

Descrição	Identificação	Certificado		
		Nº / Ano	Origem	Incerteza
Conjunto Pistão - Cilindro				
Conjunto Massas Padrão				
Gravidade Local				
manômetro padrão/ vacuômetro padrão/ manovacuômetro padrão				

- Procedimento de Medição

O instrumento foi calibrado na sua posição de trabalho em comparação a uma balança de pressão ou a um manômetro padrão / vacuômetro padrão / manovacuômetro padrão rastreado(a) ao, de acordo com o procedimento

- Resultados e Declaração de Incerteza de Medição
- As tabelasefornecem os valores indicados ($V_{ind.}$) e os respectivos valores medidos pela referência ($V_{ref.}$):

TABELA xxx - Primeiro Ciclo de Medição

Carregamento (xxxx)		Descarregamento (xxxx)	
<i>Vind.</i>	<i>Vref.</i>	<i>Vind.</i>	<i>Vref.</i>

TABELA xxx - Segundo Ciclo de Medição

Carregamento (xxxx)		Descarregamento (xxxx)	
<i>Vind.</i>	<i>Vref.</i>	<i>Vind.</i>	<i>Vref.</i>

A Tabela relata para cada valor nominal (V_{nominal}) a respectiva incerteza expandida de medição (U), que é declarada como a incerteza padrão combinada multiplicada pelo fator de abrangência k , com número graus de liberdade efetivos (ν_{eff}), correspondendo a uma probabilidade de abrangência de 95,45%. A incerteza expandida da medição foi determinada de acordo com o JCGM 100:2008 GUM 1995 with minor corrections Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement-First edition September 2008.

TABELA xxx – Incerteza de Medição

V_{nominal} (xxxx)	ν_{eff}	$k_{95,45\%}$	U (xxxx)

Histerese: %

Repetitividade: %

Erro Máximo Admissível: %

Linearidade: %

Observações

1 xxxx = xxxxxx Pa; pascal é a unidade de pressão do Sistema Internacional (SI).

ASSINATURAS

ANEXO 3

TABELA DE CONVERSÃO DE UNIDADES

↑ → =	Pa (N/m ²)	bar	(*) psi	(*) kgf/cm²	(*) (**) mm Hg = Torr	(*)(**) in Hg	(*)(***) m H₂O	(*)(***) in H₂O
1Pa = (N/m ²)	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	4,014531 x 10 ⁻³
1 bar =	1,00000 x 10 ⁵	1	1,450377 x 10	1,019716	7,500627 x 10 ²	2,953003 x 10	1,019716 x 10	4,014631 x 10 ²
(*) 1 psi =	6,894757 x 10 ³	6,894757 x 10 ⁻²	1	7,030696 x 10 ⁻²	5,171500 x 10	2,036024	7,030696 x 10 ⁻¹	2,767990 x 10
(*) 1 kgf/cm² =	9,806650 x 10 ⁴	9,806650 x 10 ⁻¹	1,422334 x 10	1	7,355602 x 10 ²	2,895906 x 10	1,000000 x 10	3,937008 x 10 ²
(*) (**) 1 mm Hg =	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
(*) (**) 1 in Hg =	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	3,453150 x 10 ⁻¹	1,359508 x 10
(*) (***) 1 m H₂O =	9,806650 x 10 ³	9,806650 x 10 ⁻²	1,422334	1,000000 x 10 ⁻¹	7,355602 x 10	2,895906	1	3,937008 x 10
(*) (***) 1 in H₂O =	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

(*) $g_N = 9,80665 \text{ m/s}^2$ (valor convencional da aceleração da gravidade)

(**) $\rho_{\text{Hg}} = 1,359508 \times 10^4 \text{ kg/m}^3$ (massa específica do mercúrio; 0^o C; $p_{\text{barométrica}} = 101325 \text{ Pa}$)

(***) $\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 1,0000 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ (massa específica da água; 4^o C ; $p_{\text{barométrica}} = 101325 \text{ Pa}$)