

INCERTEZA DA MEDIÇÃO NA CALIBRAÇÃO NO SETOR PRODUTIVO

Sebastião Raimundo de Jesus Belém Leitão Filho, sebaleitao@hotmail.com

Allan da Silva dos Santos, allansilva@hotmail.com

Ricardo da Costa Pinheiro, cardomecanica@hotmail.com

Renato Valdeilson Machado Ribeiro, renato_valdeilson@hotmail.com

Wellinton de Assunção, wellinton.assuncao@bol.com.br

Universidade Estadual do Maranhão -- UEMA, Centro de Ciências Tecnológicas -- CCT, Curso de Engenharia Mecânica, Av. Lourenço Vieira da Silva, s/n --Campus Universitário Paulo VI, Tiritical, Cep. 65055-310, São Luís Maranhão

RESUMO: Este artigo estabelece os princípios e os requisitos para a avaliação da incerteza de medição na calibração tipo A, com um mercado cada vez mais exigente, a tendência natural é a busca de maior confiabilidade e exatidão dos processos de fabricação, com isto a calibração vem ganhando mais espaço e importância dentro das empresas. Todo equipamento utilizado em ensaios e/ou calibrações, incluindo os equipamentos para medições auxiliares (por exemplo: condições ambientais), que tenha efeito significativo sobre a exatidão ou validade do resultado do ensaio, calibração ou amostragem, deve ser calibrado antes de entrar em serviço. A incerteza de medição associada às estimativas de entrada, somente é completa se ela contiver tanto o valor atribuído ao mensurando quanto a incerteza de medição associada a este valor, ou seja, a dispersão dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos ao mensurando, o tratamento é mantido em um nível geral para atender a todos os campos de calibração. O método esboçado poderá ser complementado por recomendações mais específicas para diferentes campos, para tornar a informação mais prontamente aplicável.

PALAVRAS-CHAVE: Incerteza, erros, calibração e mensurando

ABSTRACT: *This article establishes the beginnings and the requirements for the evaluation of the measurement uncertainty in the calibration type A, with a market more and more demanding, the natural tendency is the search of larger reliability and accuracy of the production processes, with this the calibration is winning more space and importance inside of the companies. Every equipment used in rehearsals or calibrations, including the equipments for auxiliary measurements (for instance: environmental conditions), that he has significant effect on the accuracy or validity of the result of the rehearsal, calibration or sampling, it should be gaged before entering in service. The measurement uncertainty associated to the entrance estimates, is only complete if she contains the value so much attributed to the measuring as the uncertainty of associated measurement and this value or be, the dispersion of the values that can be attributed reasonably to the measuring, the treatment is maintained in a general level to assist her/it all of the calibration fields. The sketched method can be complemented by more specific recommendations for different fields, to turn the information more quickly applicable.*

KEYWORDS: *Uncertainty, mistakes, calibration and measuring*

INTRODUÇÃO

Dentre as grandezas que mais se executam calibrações nas indústrias, temos a temperatura, pressão e sinais elétricos; são os mais requeridos pelos laboratórios de calibração. Nesta etapa, independente da opção da marca dos padrões de calibração, o importante é observar características típicas para atender aos requisitos de confiabilidade que os processos de fabricação exigem. Temos também o fator de segurança na engenharia, que se dar pelas incertezas na caracterização da magnitude das cargas aplicadas e dos níveis de tensão a elas associados nas condições de serviço; de uma maneira geral, os cálculos das cargas são sempre aproximados, virtualmente todos os materiais de engenharia exibem uma variabilidade nas medidas de suas propriedades mecânicas. Conseqüentemente devem ser permitidas folgas no projeto para a proteção contra falhas não previstas (W. D. CALLISTER, 2008); os mensurandos são as grandezas particulares submetidas a medição, a

incerteza do resultado de uma medição reflete a falta de conhecimento exato do valor do mensurando. Todas as medições estão afetadas de erros que podem ser provenientes do mensurando (grandezas medidas), do instrumento de medição e/ou de grandezas de influência externa. Podemos afirmar que o resultado de uma medição está afetado de um valor, que determina um intervalo de dúvida sobre ele, denominado de incerteza de medição. Não basta somente conhecer a metodologia da estatística matemática para a obtenção do cálculo de incerteza, é fundamental um bom conhecimento metrológico na área específica, para determinar a incerteza de uma forma confiável.

O cálculo da incerteza de medição, não é um mero exercício de matemática, envolvendo cálculos, ele depende basicamente de alguns conhecimentos, tais como:

- A natureza detalhada do mensurando (grandezas medidas);
- O padrão;

- As influências externas ao sistema de medição;
- A amplitude de cada componente de influência;
- E do processo de medição

Nestes casos, o conhecimento da incerteza da medição, permite decidir se o resultado obtido está dentro dos limites estabelecidos e a qualidade de uma medição é avaliada pelo nível dos erros envolvidos, porém, nem sempre é viável buscar o melhor resultado possível para qualquer tipo de medição, como num nível de um laboratório primário, por exemplo. A aceitação dos valores depende da finalidade à qual se destinam estes resultados, por exemplo, se aceita um erro provável de $\pm 20g$, em uma balança de uso culinário, porém este erro já não será aceito, caso se deseje medir a massa de pepitas de ouro.

O estabelecimento de uma adequada política de calibração não é uma atividade trivial e requer profunda análise dos mensurandos que afetam a qualidade de um dado processo.

METODOLOGIA

Erros de medição

Em geral, uma medição tem imperfeições que dão origem a um erro no resultado da medição. É o erro resultante da calibração do equipamento, isto é, a tendência ou desvio que o equipamento apresenta frente a um padrão de valor conhecido, o resultado de uma medição menos o valor verdadeiro (convencional) do mensurando. A calibração pode se alterar a qualquer momento, em função de diversos fatores, tais como temperatura, características dos materiais e componentes, ação química, desgaste de partes móveis e outros. De um modo geral os erros podem ser agrupados em três categorias: **Aleatório, sistemáticos e grosseiros**.

Figura 1. Fatores que interferem no resultado de uma medição.

Os erros aleatórios decorrem de fatores não controlados na realização de medidas e seu efeito consiste em produzir ao acaso acréscimos e decréscimos no valor obtido. Estes efeitos aleatórios são a causa de variações em observações repetidas do mensurando, ou seja, é a diferença entre o resultado de uma medição e a média de um número infinito de medições do mesmo mensurando sob condições de repetitividade. Embora não seja possível compensar o erro aleatório de um resultado de medição, ele pode geralmente ser reduzido aumentando-se o número de observações; seu valor esperado é zero. Os fatores que contribuem para o aparecimento do erro aleatório podem ser devido a atritos, vibrações, folgas, flutuações de rede, instabilidade interna, condições ambientais, etc.

Os erros sistemáticos também não podem ser eliminados, porém podem ser reduzidos. Se um erro

sistemático se origina de um efeito reconhecido de uma grandeza de influência em um resultado de medição, por exemplo, a má calibração de uma balança pode crescer sistematicamente sempre a mesma quantidade nas medidas de uma determinada massa, este efeito pode ser quantificado e corrigido.

Erro grosseiro é devido aos fatores externos e não aos instrumentos. A origem do erro grosseiro pode ser fortemente identificada: Leitura errônea ou imprópria do instrumento, defeito do sistema de medição ou instrumento fora do zero, manipulação indevida, anotação dos resultados diferente dos valores lidos, etc. Embora a eliminação completa do erro grosseiro seja impossível, sua causa deve ser detectada e reduzida, principalmente com o treinamento do pessoal envolvido.

Inserir, aqui, a seção ‘material e métodos’, empregando a fonte Times New Roman, tamanho 10, texto justificado, com parágrafo simples.

Propriedades estatísticas dos sistemas de medição

A *exatidão* definida como o grau de “proximidade” ao valor verdadeiro, ou a um valor convencionalmente aceito como de referência. A *Tendência* é definida como a diferença entre a média observada de medições repetidas e o valor de referência, isto é, é o “erro sistemático” do sistema de medição.

A *Estabilidade* é a mudança de a tendência no transcorrer do tempo. Um processo de medição estável deve estar sob controle estatístico com respeito a sua localização. É também conhecida como um deslocamento lento e gradual.

A *Linearidade* é a mudança da tendência ao longo do campo de operação normal do sistema de medição. É uma correlação dos múltiplos e independentes erros de tendência ao longo do campo de operação, isto é, um “erro sistemático” que faz parte do sistema de medição.

A *Repetitividade* Está associada a variação entre medições obtidas com um mesmo instrumento quando usado várias vezes por um mesmo avaliador, enquanto estiver medindo idêntica característica de uma mesma peça. Variação entre sucessivas medições, em curto prazo e, feitas sob condições fixas e definidas. Comumente descrita como a variação do equipamento ou a variação do próprio sistema de medição.

Avaliação tipo A e tipo B

O conceito de erro e de sua análise é prática antiga em metrologia, mas o conceito de incerteza como um atributo de confiabilidade é relativamente novo. A incerteza de medição associada as estimativas de entrada é avaliada de acordo com os métodos de avaliação do Tipo A ou do Tipo B. A **avaliação do Tipo A** da incerteza padrão é o método de avaliação da incerteza pela análise estatística de uma série de observações. Neste caso, a incerteza padrão é o desvio padrão experimental da média que se obtêm de um procedimento de cálculo da média aritmética ou de uma análise de regressão adequada. A **avaliação do**

Tipo B da incerteza padrão é o método de avaliação da incerteza por outros meios que não sejam pela análise estatística de uma série de observações. Neste caso, a avaliação da incerteza padrão é baseada em algum outro conhecimento científico, como a incerteza determinada a partir de informações adjacentes, ao processo de medição, como por exemplo, a incerteza do padrão, tipo de indicação do instrumento, temperatura ambiente, gradientes de temperatura, instabilidade no funcionamento.

Caso exista a necessidade de subdividir a seção, colocar o subtítulo de cada divisão em negrito, mantendo a mesma formatação, sem deixar linha em branco.

Avaliando a incerteza padrão tipo A

Uma estimativa do mensurando Y , a estimativa de saída designada por y , é obtida pela equação (1) usando estimativas de entrada x_i para os valores das grandezas de entrada X_i :

$$Y = f(X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n) \quad (1)$$

Na maioria dos casos, a melhor estimativa disponível do valor esperado de uma grandeza X que varia aleatoriamente e para a qual n observações independentes foram obtidas sob as mesmas condições de medição, é a **média aritmética** ou **média** das n observações, o valor mais provável da medida de uma variável das medidas efetuadas. A média aritmética é dada pela seguinte expressão:

$$\bar{X} = \frac{(X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n)}{n} \quad (2)$$

Simplificando em:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (3)$$

Sendo; x_i = valor independente de cada medição; n = número de medições.

A incerteza de medição associada com a estimativa é avaliada de acordo com um dos seguintes métodos: Uma estimativa da variância da distribuição de probabilidade fundamental é a **variância experimental** $S^2(x)$ dos valores de X_i que é a variância estimada (experimental) das medidas de dados contínuos de uma amostra:

$$S^2(x) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2 \quad (4)$$

A raiz quadrada positiva da variância experimental é conhecida como **desvio padrão experimental**, O desvio padrão experimental é calculado com base em amostras, qual se utiliza em metrologia. Um valor alto para o desvio padrão corresponde a um elevado grau de espalhamento., ou seja, caracteriza a variabilidade dos

valores de X_i observados, mais especificamente, sua dispersão em torno da média; de acordo com a expressão abaixo:

$$S^2(x) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2} \quad (5)$$

A melhor estimativa da variância da média aritmética " \bar{X} " é a **variância experimental da média** dada pela expressão seguinte:

$$S^2(\bar{X}) = \frac{S^2(X)}{n} \quad (6)$$

Substituindo a equação (4) em (5), ficamos com a seguinte expressão:

$$S^2(\bar{X}) = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \quad (7)$$

Onde a raiz quadrada positiva de $S^2(\bar{X})$ é o **desvio padrão experimental da média**, $S(\bar{X})$. Este valor quantifica quão bem estima o valor esperado de " \bar{X} " e qualquer um dentre eles pode ser usado como medida da incerteza de " \bar{X} ".

$$S(\bar{X}) = \frac{\sqrt{S^2(\bar{X})}}{\sqrt{n}} \quad (8)$$

Para uma grandeza de entrada determinada por n observações repetidas independentes, podemos dizer que a **incerteza padrão da média** é o desvio padrão experimental da média. Substituindo a expressão (6) em (7), ficamos com a equação da incerteza, $U(\bar{X})$:

$$U(\bar{X}) = S(\bar{X}) = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(X_i - \bar{X})^2}{n-1}}}{\sqrt{n}} \quad (9)$$

Expandindo a equação (8), colocando os desvios da média, ficamos com a equação completa da incerteza na medição, parâmetro, associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser fundamentalmente atribuídos a um mensurando.

$$U(X_i) = \frac{S\bar{X}}{\sqrt{n}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(X_1 - \bar{X})^2 + (X_2 - \bar{X})^2 + \dots + (X_n - \bar{X})^2}{n-1}}}{\sqrt{n}} \quad (10)$$

Esta estimativa da variabilidade das medidas devido a erros aleatórios por meio do desvio padrão supõe que a frequência das medidas obedece à distribuição gaussiana dada na figura 1, seguinte. Nesta figura temos a representação gráfica de uma distribuição

normal. Estão indicadas as percentagens de casos por desvio padrão $\sigma = S(Xi)$.

Figura 2. Distribuição gaussiana

$$X = \bar{X} \pm S(\bar{X}) \quad (11)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

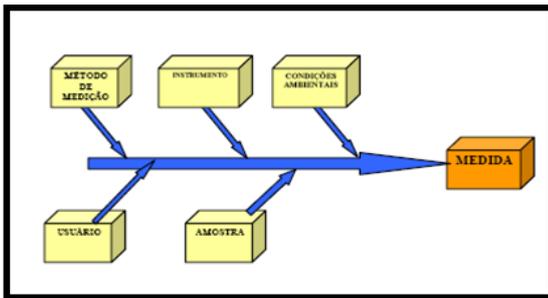


Figura 1. Fatores que interferem no resultado de uma medição.

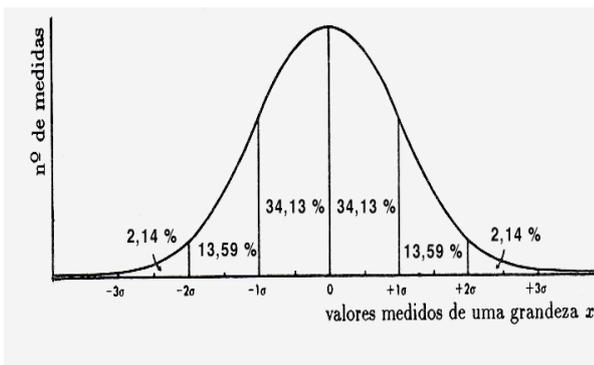


Figura 2. Distribuição gaussiana

Como expressar o resultado das medidas

O procedimento estatístico usualmente indicado para o tratamento de medidas experimentais consiste justamente em fazer os cálculos acima indicados e expressar o valor de uma grandeza \bar{X} usando os dados obtidos com as relações (3) e (4). O resultado de uma medição nunca é um ponto e sim um intervalo. Admitir que o valor exato existe e embora ele não seja conhecido, podemos estimar os limites do intervalo em que ele se encontra.



Figura 3. Intervalo de uma medida.

Um sistema pistão-cilindro ser montado sobre as seguintes informações.

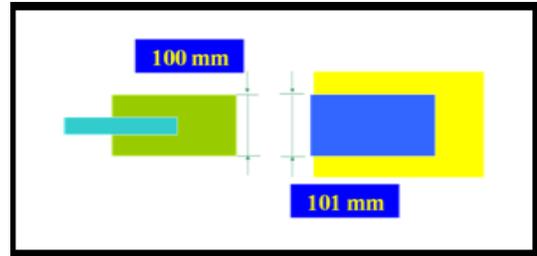


Figura 4. Ajuste cilindro pistão.

Considerar que essas peças foram calibradas e apresentaram erro zero. Se a incerteza for ± 1 mm.

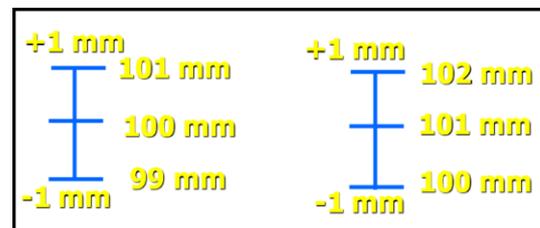


Figura 5. Ajuste cilindro pistão.

Valor da grandeza = média das n medidas \pm desvio padrão da média.

No caso, $X = 100\text{mm} \pm 1\text{mm}$

Equação (11)

CONCLUSÃO

A incerteza de medição deve ser estimada para cada processo de calibração abrangido pelo sistema de gestão da confirmação metrológica, estimativas da incerteza decorrentes das calibrações devem ser registradas. A análise das incertezas de medição deve ser completada antes da calibração do equipamento e da validação do processo de calibração. Todas as fontes conhecidas da variabilidade dos processos de calibração e respectivas medições devem ser documentadas. Os equipamentos de inspeção, medição e ensaios devem ser utilizados de tal forma, que assegurem que a incerteza das medições seja conhecida e consistente com a capacidade de medição requerida e importância em atender aos processos de calibração e um ambiente favorável dentro das empresas para que se consiga confiabilidade e exatidão na fabricação, com qualidade assegurada.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente a Deus, em segundo lugar ao professor orientador Welliton que nos deu a

possibilidade de publicarmos esse artigo, e em terceiro lugar aos demais alunos que contribuíram para a conclusão desse projeto.

REFERÊNCIAS

- Adval de Lira, Francisco. **Metrologia na Indústria**. 6º Ed. Editora Érica. São Paulo, 2007.
- Alves da Silva, Joel. **Calibração de Padrões Internos de Trabalho e de Instrumentos Críticos**. Encontro para Qualidade de Laboratórios 7 a 9 de Junho de 2005, São Paulo – BRASIL.
- CERVO, L. Amado; PEDRO, Alcino Bervian. **Metodologia científica**. 5º ed. São Paulo: Prentice Hall, 2001
- COSTA, S.F. **Introdução ilustrada à estatística**. 4a ed. São Paulo: Harbra, 2005. 399p
- Guia para a Expressão da Incerteza de Medição**. 3ª ed. Brasileira. ABNT/ Inmetro, agosto de 2003.
- Guide to the Expression of Uncertainties in Testing – NIS 80. Namas, setembro de 1994.
- INMETRO. **Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia**. 2. ed. Rio de Janeiro, INMETRO, 2000. 75 p.
- Roberto, Luís. **Calibração periódica de instrumentos de medição**. Encontro para Qualidade de Laboratórios 1 a 3 de Junho de 2004, São Paulo – BRASIL.
- SILVA, LUIZ ROBERTO DA SILVA. **A geração de dados de medições confiáveis no setor produtivo**. CEFET-RJ, Rio de Janeiro, 2006. Brasil,
- W. D. CALLISTER, Jr. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma Introdução**. 7ª Ed, LTC, Rio de Janeiro, 2008.

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis por este artigo.