Incerteza de Medição

INMETRO

Apresentação

Nesta aula estudaremos a incerteza de medição. Aprenderemos a estimá-la e a analisá-la. Veremos também que o resultado de uma medição só estará completo se for acompanhado de sua incerteza, a qual pode ser oriunda do instrumento de medição, do item sendo medido, do ambiente, do operador, entre outros.

A incerteza pode ser estimada através da análise estatística de um conjunto de medições, bem como da utilização de outros tipos de informação sobre o processo de medição. Aprenderemos que existem procedimentos estabelecidos para o cálculo de uma estimativa global de incerteza a partir de informações individuais.

Esperamos que, ao fim desta aula, você seja capaz de analisar dados de incerteza presentes nas atividades de um agente de metrologia legal, sabendo que o conhecimento e a compreensão da incerteza de uma medição nos ajudarão a tomar melhores decisões na rotina de trabalho.

Bons estudos!
Morgana Scariot

Sumário

Incerteza de Medição

1. O que é Incerteza de Medição?

Incerteza de medição é a dúvida que existe a respeito do resultado de uma medição. O Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM) define incerteza da medição como um “parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando, com base nas informações utilizadas”.

Para toda medição – até a mais cuidadosa – existe sempre uma margem de dúvida, expressa como “mais ou menos” algum valor. Por exemplo, uma barra de metal pode medir um metro de comprimento “mais ou menos um centimetro”.

1.1 Expressando a Incerteza de Medição

Uma vez que sempre existe uma margem de dúvida a respeito do resultado de uma medição, necessitamos saber quão grandes são esta margem e esta dúvida. Então dois números são necessários para quantificar uma incerteza. Um é a largura da margem ou intervalo. O outro é a probabilidade de abrangência, que informa quão certos estamos de que o valor da medição está dentro daquela margem ou intervalo.

Por exemplo, podemos dizer que o comprimento de uma barra é 20 centimetros mais ou menos 1 centimetro, com uma probabilidade de abrangência de 95%. Esse resultado pode ser reescrito da seguinte forma:

20 cm ± 1 cm, para uma probabilidade de abrangência de 95%.

Essa afirmação diz que estamos 95% certos de que a barra mede entre 19 e 21 cm.

1.2 Erro versus Incerteza

É importante não confundir os termos “erro” e “incerteza”. Erro é a diferença entre o valor medido e o valor de referência da grandeza que estamos medindo. Incerteza é a quantificação da dúvida sobre o resultado da medição.

Sempre que possível, tentamos corrigir erros conhecidos: por exemplo, através da aplicação de correções declaradas nos certificados de calibração. Mas todo erro de valor desconhecido é uma fonte de incerteza.

2. Estatística Básica Aplicada a um Conjunto de Números

Podemos extrair uma quantidade maior de informações de nossas medições efetuando alguns cálculos estatísticos básicos com elas, como veremos a seguir.

2.1 Média Aritmética

Se repetidas medições dão origem a resultados um pouco diferentes entre si, não significa que estejamos medindo errado. Isso pode ser devido a variações naturais no que está acontecendo. Por exemplo, o valor da velocidade do vento na rua normalmente não será constante. Além disso, os instrumentos de medição muitas vezes não apresentam um comportamento completamente estável. E uma trena pode deformar-se e fornecer resultados diferentes. Se houver variação entre as leituras quando elas são repetidas, é melhor calcular a média aritmética.

A média aritmética nos fornece uma estimativa do valor "verdadeiro" do mensurando. Ela é normalmente representada por um símbolo com uma barra em cima. Por exemplo, é o valor médio de x. A figura 1 ilustra um conjunto de valores e sua média aritmética. E o exemplo 1 mostra como calcular uma média aritmética.

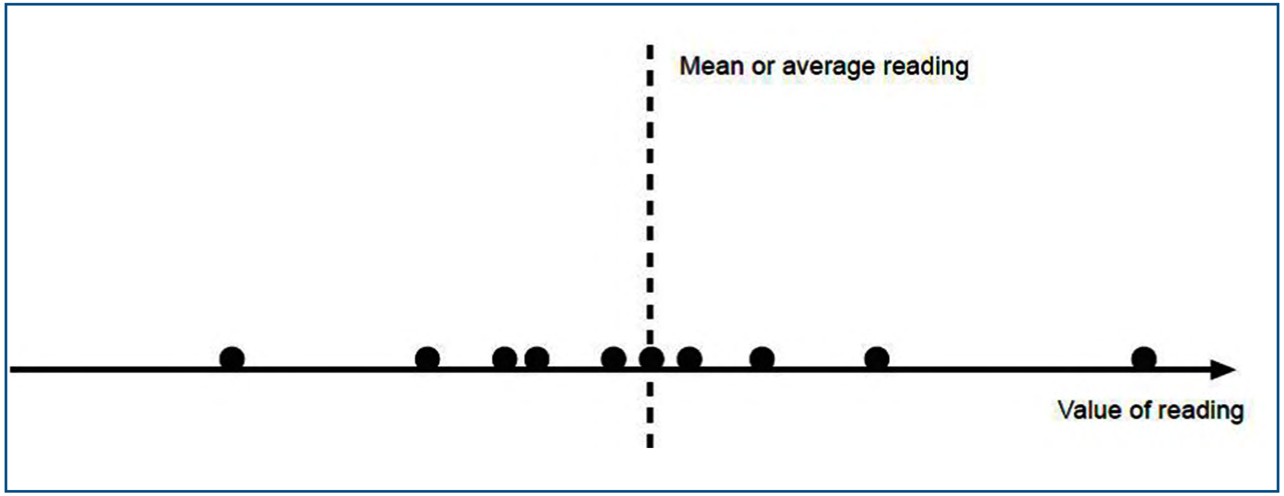

Figura 1- Ilustração de um conjunto de valores e da sua média aritmética

Exemplo 1 – Cálculo da média de um conjunto de dados

Consideremos um conjunto de 10 medições. Para calcular a média aritmética, devemos somar todos os dados e dividir o total pelo número de medições (neste caso, 10).

Medições: 16, 19, 18, 16, 17, 19, 20, 15, 17, 13.

O somatório dos dez valores resulta em 170.

Então a média aritmética do conjunto de dados em questão é:

$$\frac{170}{10} = 17$$

De maneira geral, quanto mais resultados tivermos, melhor será a estimativa que faremos do valor "verdadeiro". O ideal seria calcular a média aritmética de um conjunto infinito de valores, pois quanto mais resultados utilizarmos, mais perto da estimativa ideal estaremos. Contudo, a realização de muitas medições nem semprecompensa o esforço despendido. Em geral, quatro a dez medições são suficientes.

2.2 Desvio-padrão

Quando repetidas medições nos fornecem diferentes resultados, é importante termos conhecimento da dispersão desses dados. A dispersão dos valores nos dá informação sobre a incerteza da medição. Sabendo a magnitude da dispersão, podemos começar a julgar a qualidade de nossas medições.

A forma usual de quantificarmos a dispersão é através do cálculo do desvio-padrão. O desvio-padrão de um conjunto de dados nos informa sobre a distância entre cada dado e a média aritmética do conjunto.

De forma genérica, aproximadamente dois terços dos dados de um determinado conjunto estarão compreendidos entre mais ou menos um desvio-padrão da média aritmética; aproximadamente 95% dos dados estarão entre mais ou menos dois desvios-padrão. Essas constatações são de grande aplicabilidade, mas não são universais.

O valor "verdadeiro" para o desvio-padrão apenas pode ser calculado a partir de um conjunto muito grande (infinito) de dados. Na prática, apenas uma estimativa do desvio-padrão pode ser encontrada. A letra "s" normalmente é utilizada para representar o desvio-padrão estimado.

O exemplo 2 mostra como calcular o desvio-padrão estimado.

Exemplo 2 – Cálculo do desvio-padrão estimado de um conjunto de dados

Vamos utilizar o conjunto de dados do exemplo 1: 16, 19, 18, 16, 17, 19, 20, 15, 17.

A primeira coisa que temos a fazer é calcular a média aritmética, que, de acordo com o exemplo 1, é 17. Depois temos que calcular a diferença entre cada valor e a média aritmética:

-1, +2, +1, -1, 0, +2, +3, -2, 0 e -4.

E elevar cada diferença ao quadrado:

1, 4, 1, 1, 0, 4, 9, 4, 0 e 16.

Após, somamos os quadrados obtidos e dividimos por n-1 (neste caso n é 10, então n - 1 = 9):

$$\frac{1+4+1+1+0+4+9+4+0+16}{10-1} = \frac{40}{9} = 4{,}44$$

Por fim, o desvio-padrão estimado "s" é encontrado extraindo a raiz quadrada do resultado obtido na operação aqui realizada:

$$s = \sqrt{4,44} = 2,1$$

Todas as operações que acabamos de realizar podem ser resumidas, para um conjunto de n dados, na equação 1:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}} \qquad (1)$$

Onde xi é o iésimo resultado de um conjunto de medições e é a média aritmética dos n resultados em questão.

2.3 Distribuições de Probabilidade

A dispersão de um conjunto de valores pode assumir diferentes formas ou distribuições de probabilidade.

Uma distribuição de probabilidade é uma relação entre o resultado de um experimento estatístico e a probabilidade de sua ocorrência. As distribuições de probabilidade podem assumir diferentes formas quando representadas graficamente, conforme veremos a seguir.

2.3.1 Distribuição Normal

Em um conjunto de leituras, algumas vezes os valores apresentam maior probabilidade de estarem próximos à média aritmética do que distantes dela. Essa característica é típica de uma distribuição normal ou gaussiana. Podemos observar esse tipo de distribuição se examinarmos as alturas de indivíduos de uma amostra representativa de homens. A maioria dos homens tem a altura próxima à média aritmética das alturas. Poucos são muito altos ou muito baixos. Um esboço de uma distribuição normal é mostrado na figura 2.

Probabilidade de ocorrência

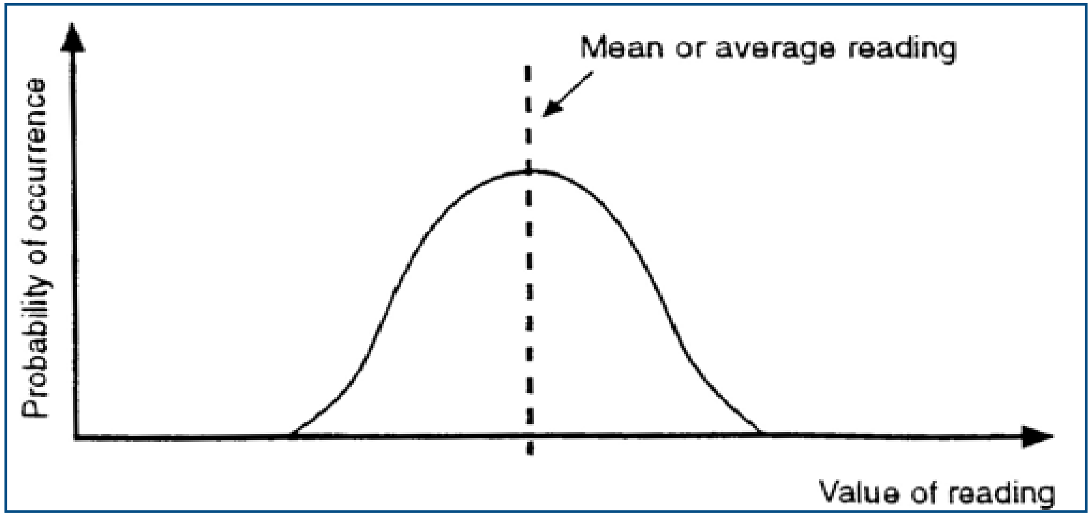

Figura 2 – Esboço de uma distribuição normal

2.3.2 Distribuição Retangular ou Uniforme

Quando os valores medidos estão espalhados de forma "parelha" entre o maior e o menor valor medido, temos uma distribuição retangular ou uniforme. Isso pode ser observado ao examinarmos a forma como gotas de chuva caem em um fio de luz, fino e longo, por exemplo. A probabilidade de elas caírem em uma parte ou outra do fio é a mesma. Um esboço de uma distribuição uniforme é apresentado na figura 3.

Probabilidade de ocorrência

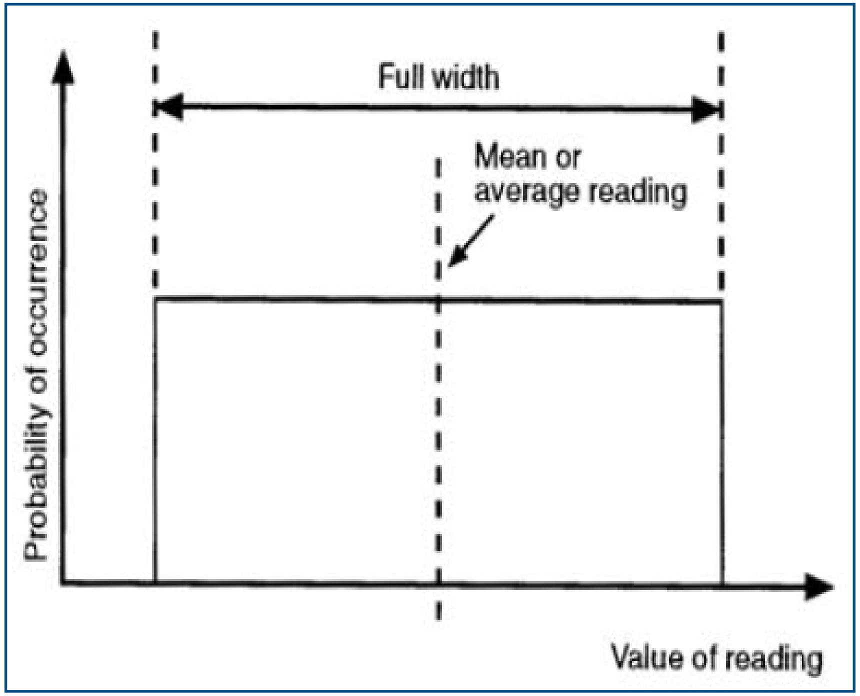

Figura 3 – Esboço de uma distribuição uniforme

2.3.3 Outras Distribuições

Mais raramente, outras distribuições de probabilidade podem ocorrer, como a triangular e a bimodal.

3. O que Origina a Incerteza?

Muitos são os fatores da origem da incerteza. O resultado de uma medição, após correção dos efeitos sistemáticos reconhecidos, é apenas uma estimativa do valor do mensurando, por causa da incerteza proveniente dos efeitos aleatórios e da correção imperfeita do resultado para efeitos sistemáticos. Na prática existem muitas fontes possíveis de incerteza, como:

- Definição incompleta do mensurando.
- Realização imperfeita da definição do mensurando.
- Amostragem não representativa – a amostra medida pode não representar o mensurando definido.
- Conhecimento inadequado dos efeitos das condições ambientais sobre a medição ou medição imperfeita das condições ambientais.
- Erro de tendência pessoal na leitura de instrumentos analógicos.
- Resolução finita do instrumento ou limiar de mobilidade.
- Valores inexatos dos padrões de medição e materiais de referência.
- Valores inexatos de constantes e outros parâmetros obtidos de fontes externas e usados no algoritmo de redução de dados.
- Aproximações e suposições incorporadas ao método e procedimento de medição.
- Variações nas observações repetidas do mensurando sob condições aparentemente idênticas.

É importante observarmos que estas fontes não são necessariamente independentes entre si. Naturalmente, um efeito sistemático não reconhecido não pode ser levado em consideração na avaliação da incerteza do resultado de uma medição, porém contribui para seu erro.

4. Outros Conhecimentos Necessários para o Cálculo da Incerteza

Para calcularmos a incerteza, primeiramente devemos identificar suas fontes e estimar a incerteza de cada uma. Depois as incertezas individuais devem ser combinadas, fornecendo-nos um único valor global. Existem regras para estimarmos a contribuição de cada incerteza e para combiná-las, conforme veremos a seguir.

4.1 As Duas Formas de Estimar Incertezas

Há duas abordagens na estimativa da incerteza de medição: tipo A e tipo B. Na maioria das situações, ambas são necessárias.

Incerteza do tipo A – incerteza estimada a partir da distribuição estatística dos valores provenientes de repetidas de medições.

Incerteza do tipo B – incerteza estimada de outra forma que não estatística. Pode ser baseada na experiência de experimentos passados, em certificados de calibração, em especificações de fabricantes, em informações de publicações científicas, entre outros.

4.2 Incerteza-padrão

Todas as contribuições de incerteza devem ser expressas com a mesma probabilidade de abrangência. Para tal, necessitamos convertê-las em incertezas-padrão. A incerteza-padrão é o intervalo cujo tamanho pode ser pensado como mais ou menos um desvio-padrão. Normalmente a incerteza-padrão é representada pela letra u ou u(y) (incerteza-padrão para y).

4.2.1 Incerteza-padrão do tipo A

Quando coletamos várias leituras repetidas, podemos calcular a média aritmética e o desvio-padrão do conjunto dado. De posse desses parâmetros, calculamos a incerteza-padrão u a partir da equação 2:

$$u = \frac{s}{\sqrt{n}} \qquad (2)$$

Onde n é o número de leituras.

4.2.2. Incerteza-padrão do tipo B

Quando a informação é mais escassa (em algumas estimativas do tipo B), provavelmente só seremos capazes de estimar os limites inferior e superior da incerteza. Teremos então que assumir que determinado valor tem a mesma probabilidade de estar em qualquer lugar entre os dois extremos, isto é, que ele pertence a uma distribuição retangular ou uniforme. A incerteza-padrão para uma distribuição retangular é calculada através da equação 3:

$$u_{retangular} = \frac{a}{\sqrt{3}} \qquad (3)$$

Onde a é metade da largura do intervalo entre os limites inferior e superior.

Distribuições retangulares ou uniformes ocorrem muito comumente, mas não estamos impedidos de utilizar alguma outra distribuição se tivermos um bom motivo para isso.

4.3 Conversão de Unidades

As contribuições de incerteza devem ser expressas nas mesmas unidades antes de elas serem combinadas.

Se medirmos um comprimento, por exemplo, a incerteza da medição deve ser declarada em unidades de comprimento. Contudo, uma fonte de incerteza pode ser a variação da temperatura do ambiente. Embora a fonte dessa incerteza seja a temperatura, seu efeito dar-se-á em termos de comprimento e, por isso, ela deve ser contabilizada em uma unidade de comprimento. Como, ao ser medido, o objeto se expande 0,1% em comprimento por grau de aumento de temperatura, uma incerteza de temperatura de ± 2 °C refletiria em uma incerteza no comprimento de ± 0,2 cm, supondo um objeto de 100 cm de comprimento.

Uma vez que as incertezas-padrão estão em unidades compatíveis entre si, a incerteza combinada pode ser encontrada, como veremos a seguir.

4.4 Combinação de Incertezas-padrão

Incertezas-padrão, sejam elas do tipo A ou do tipo B, podem ser combinadas através de soma quadrática. O resultado dessa soma quadrática é a incerteza-padrão combinada, uc ou uc (y).

4.4.1 Soma quadrática para adição ou subtração

Devemos utilizar a soma quadrática quando o resultado que buscamos é obtido através da adição ou da subtração de uma série de valores medidos. Por exemplo, se quisermos saber qual é o comprimento de uma cerca constituída por ripas de madeira de diferentes larguras. Considerando que a incerteza-padrão (em metros) de cada ripa que constitui a cerca seja a, b, c, etc., então a incerteza-padrão combinada do comprimento da cerca será encontrada através da equação 4:

$$u_c = \sqrt{a^2 + b^2 + c^2 + \ldots etc.} \qquad (4)$$

4.4.2 Soma quadrática para multiplicação ou divisão

Nesse caso, é conveniente trabalharmos em termos de incertezas relativas ou fracionárias, para simplificação dos cálculos. Como exemplo, podemos citar o cálculo da área A de um tapete retangular, através da multiplicação das suas dimensões largura e comprimento. A incerteza relativa ou fracionária da área do tapete pode ser calculada a partir das incertezas fracionárias da largura e do comprimento. Para um comprimento L1 com uma incerteza u(L1), a incerteza relativa é u(L1)/L1. Para uma largura L2, a incerteza relativa é u(L2)/L2. Dessa forma, a incerteza relativa u(A)/A da área é dada pela equação 5:

$$\frac{u(A)}{A} = \sqrt{\left(\frac{u(L1)}{L1}\right)^2 + \left(\frac{u(L2)}{L2}\right)^2} \qquad (5)$$

Para um caso em que o resultado tenha que ser determinado multiplicando três fatores, a equação 5 teria três termos sendo somados dentro da raiz; se fossem quatro fatores para multiplicar, seriam quatro termos dentro da raiz, e assim sucessivamente.

A equação 5 também pode ser utilizada, exatamente da mesma forma, para casos em que o resultado final da medição é um quociente de dois valores, ou seja, um número dividido pelo outro.

4.4.3 Soma quadrática para outras operações

Quando tivermos que elevar ao quadrado (por exemplo, Z2) um valor para o cálculo do resultado final de uma medição, a incerteza relativa desse valor terá a seguinte forma:

$$\frac{2u(Z)}{Z} \qquad (6)$$

E quando uma raiz quadrada (por exemplo, √Z) fizer parte do cálculo de um resultado, então a incerteza relativa desse valor terá a seguinte forma:

$$\frac{u(Z)}{2Z} \qquad (7)$$

Obviamente, para chegar ao resultado que buscamos, muitas vezes temos que utilizar fórmulas envolvendo combinações de adição, subtração, multiplicação, divisão, etc. Um exemplo é o cálculo da potência elétrica P, utilizando dados obtidos de medições da resistência elétrica R e da tensão V, conforme a equação 8:

$$P = \frac{V^2}{R} \qquad (8)$$

Nesse caso, a incerteza relativa u(P)/P é dada por:

$$\frac{u(P)}{P} = \sqrt{\left(\frac{2u(V)}{V}\right)^2 + \left(\frac{u(R)}{R}\right)^2} \qquad (9)$$

De forma geral, para cálculos em diversas etapas, o processo de combinação de incertezas-padrão de forma quadrática também pode ser realizado em várias etapas, aplicando-se as “regras” apresentadas para cada operação matemática. Entretanto, a combinação de incertezas-padrão para fórmulas mais complexas foge aos objetivos deste curso.

4.4.4 Correlação

As equações que aprendemos para o cálculo da incerteza-padrão combinada apenas podem ser utilizadas se as incertezas-padrão de entrada não estiverem relacionadas entre si ou correlacionadas. Isso significa que é sempre importante nos perguntarmos se todas as contribuições da incerteza são independentes entre si.

Um grande erro em uma grandeza de entrada poderia causar um grande erro em outra? Alguma influência externa, como a temperatura, poderia ter um efeito semelhante em vários componentes da incerteza de uma vez só?

Erros individuais frequentemente são independentes, mas, se eles não forem, cálculos adicionais, que não serão abordados neste curso, são necessários.

4.5 Incerteza Expandida

Como vimos, a probabilidade de abrangência para a incerteza-padrão combinada é de um desvio-padrão. Contudo, pode ser que queiramos ou que necessitemos declarar a incerteza para outra probabilidade de abrangência. Essa mudança de intervalo de abrangência pode ser feita utilizando o fator de abrangência k. Multiplicar a incerteza-padrão combinada uc por um fator de abrangência k resulta no que chamamos de incerteza expandida U, isto é:

$$U = k.u_c \qquad (10)$$

Normalmente a incerteza expandida é calculada para k = 2, o que significa uma probabilidade de abrangência de 95,4 % (considerando que a incerteza-padrão combinada siga uma distribuição normal de probabilidade). Se k = 3, considerando uma distribuição normal, a probabilidade de abrangência é de 99,7 %.

Outras distribuições de probabilidade, menos comuns, apresentarão diferentes fatores de abrangência.

É importante observar que, sempre que soubermos o valor de uma incerteza expandida e do seu fator de abrangência, podemos encontrar o valor da incerteza-padrão combinada aplicando a equação 10, dividindo a incerteza expandida pelo fator de abrangência.

4.6 Expressão da Resposta Final

É importante expressar a resposta final de forma que o interessado possa efetivamente utilizar as informações. As principais informações a declarar são:

I. O resultado da medição e sua incerteza. Por exemplo: “O comprimento da barra é 20 cm ± 1 cm”.

II. O fator de abrangência e a probabilidade de abrangência. Por exemplo: “A incerteza declarada baseia-se em uma incerteza-padrão multiplicada pelo fator de abrangência k = 2, para uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%”.

III. Como a incerteza foi estimada (podemos, por exemplo, fazer referência a uma publicação onde o método esteja descrito).

5 Cálculo Básico de Incerteza

A seguir será apresentado um exemplo de cálculo de incerteza. Ele não é 100% realista, pois o objetivo é que seja simples e claro o suficiente para ilustrar o método.

5.1 A Medição – Qual é o Comprimento da Corda?

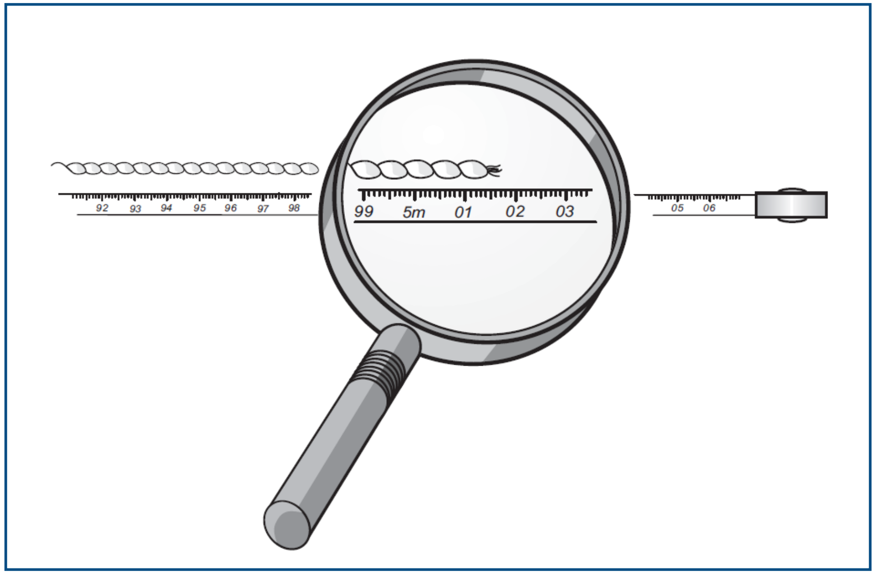

Figura 4 – Medindo o comprimento de uma corda

Passo 1: Temos que decidir quais medições e cálculos são necessários para produzir o resultado final. Efetuaremos a medição do comprimento utilizando uma trena. Além do comprimento medido com a trena, é possível que tenhamos que considerar:

a. Possíveis erros devido à trena

- Ela necessita alguma correção? Qual é a incerteza da calibração?
- Ela pode deformar-se?
- O uso da trena pode tê-la encurtado? Quanto deve ter mudado o seu comprimento desde a última calibração?
- Qual é a sua resolução?

b. Possíveis erros devido à corda

- A corda permanece reta? Ela está muito ou pouco esticada?
- A temperatura e/ou umidade (ou qualquer outra variável) influencia no comprimento?
- As pontas da corda são bem definidas ou esfiapadas?

c. Possíveis erros devido ao processo de medição e à pessoa que faz a medição

- Quão bem é possível alinhar a ponta da corda com a ponta da trena?
- É possível alinhar bem paralelamente a trena com a corda?
- A medição é repetitiva?

Você consegue pensar em alguma outra consideração?

Passo 2: Medimos a corda dez vezes e anotamos todos os valores de comprimento obtidos. Vamos supor que a média aritmética e o desvio-padrão das dez medidas sejam, respectivamente, 5,017 m e 0,0021 m (2,1 mm). Também é importante que registremos:

- Quando as medidas foram realizadas.
- Como as medidas foram realizadas. Por exemplo, se foram efetuadas no chão ou verticalmente, detalhes de como realizamos o alinhamento da trena e da corda, etc.
- Qual trena foi utilizada.
- Condições ambientais (se acharmos que elas podem afetar os resultados).
- Qualquer outra informação que julguemos relevante.

Passo 3: Devemos olhar para todas as fontes de incerteza possíveis e estimar o valor de cada uma delas. Supomos que nesse caso:

I. A trena foi calibrada e não necessita de nenhuma correção. A incerteza declarada no seu certificado de calibração é 0,1% do valor lido, considerando um fator de abrangência k = 2 (para uma distribuição normal). Nesse caso, 0,1 % de 5,017 m é próximo a 5 mm. Dividindo por 2, temos que a incerteza-padrão (para k = 1) é u = 2,5 mm.

III. A divisão da trena é 1 mm, o que faz com que possamos esperar, na leitura, um erro não superior a $\pm$0,5 mm. Além disso, podemos considerar uma incerteza uniformemente distribuída (os valores medidos podem estar em qualquer lugar dentro de um intervalo de 1 mm). Para encontrar a incerteza-padrão, dividimos metade da divisão por $\sqrt{3}$, o que resulta em, aproximadamente, u = 0,3 mm.

III. A trena permanece bem reta, esticada, mas vamos supor que a corda inevitavelmente apresente algumas pequenas irregularidades, não podendo ficar bem esticada. Dessa forma, a medição provavelmente vai subestimar o comprimento real da corda. Vamos “chutar” que o valor medido seja então cerca de 0,2% menor do que o real e que a incerteza de fazer esse “chute” também seja, no máximo, 0,2%. Isso significa que podemos corrigir o resultado somando 0,2% (cerca de 10 mm). Como não temos informações, podemos assumir que a incerteza seja distribuída uniformemente. Dividindo metade do intervalo da incerteza (10 mm) por $\sqrt{3}$, teremos uma incerteza-padrão u = 5,8 mm.

As estimativas de incerteza que vimos até agora são todas do tipo B. A seguir veremos uma estimativa do tipo A.

IV. O desvio-padrão nos informa sobre a repetitividade da medição em si. Vamos supor que, através da equação 1, encontramos s = 2,1 mm. Dessa forma, calculamos a incerteza como segue:

$$u = \frac{s}{\sqrt{n}} = \frac{2{,}1}{\sqrt{10}} = 0{,}7 \text{ mm}$$

Consideraremos que nenhuma outra incerteza necessita ser contabilizada nesse exemplo.

Passo 4: Decidimos se as fontes de incerteza listadas são independentes entre si. Para esse exemplo, vamos dizer que elas são todas independentes. Caso elas não fossem, é importante lembrar que cálculos adicionais seriam necessários.

Passo 5: Calculamos o resultado da nossa medição, incluindo as correções conhecidas. Nesse caso, o resultado é obtido da média das leituras e da correção para o fato de a corda não permanecer bem reta, esticada, durante a medição, ou seja:

$$5{,}017\ m + 0{,}010\ m = 5{,}027\ m$$

Passo 6: Vamos calcular a incerteza-padrão combinada. Como o único cálculo necessário para encontrarmos o resultado foi a adição de uma correção, então devemos utilizar a equação 4 para encontrar o que procuramos:

$$u_c = \sqrt{2{,}5^2 + 0{,}3^2 + 5{,}8^2 + 0{,}7^2} = 6{,}4\ mm$$

Passo 7: Agora podemos calcular a incerteza expandida. Para um fator de abrangência k = 2, basta multiplicar o valor da incerteza-padrão combinada (calculada no passo 6) por 2, em conformidade com a equação 10, para uma probabilidade de abrangência de 95%:

$$U = 2\ x\ 6{,}4 = 12{,}8\ mm = 0{,}0128\ m$$

Passo 8: Veremos agora o resultado da medição, a incerteza e a forma como ambos foram encontrados:

“O comprimento da corda é 5,027 m ± 0,013 m. A incerteza expandida foi calculada multiplicando a incerteza-padrão combinada pelo fator de abrangência k = 2, para uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.”

“A incerteza foi estimada de acordo com o método da aula sobre incerteza de medição.”

5.2 Análise da Incerteza – Tabela

Com o objetivo de ajudar no processo de cálculo, resumiremos a análise de incerteza em uma tabela, como será mostrado a seguir.

Fonte de incerteza	Valor (±)	Distribuição de probabilidade	Divisor	Incerteza-padrão
Incerteza do padrão	5,0 mm	Normal	2	2,5 mm
Resolução do padrão	0,5 mm	Retangular	$\sqrt{3}$	0,3 mm
Corda não permanece perfeitamente reta	10,0 mm	Retangular	$\sqrt{3}$	5,8 mm
Incerteza-padrão das dez medidas	0,7 mm	Normal	1	0,7 mm
Incerteza-padrão combinada		Assumida normal		6,4 mm
Incerteza expandida		Assumida normal		12,8 mm

6. Minimizando a Incerteza de Medição

É importante lembrar que minimizar as incertezas é tão ou mais importante do que quantificá-las. Existem algumas boas práticas que podem ajudar a reduzir incertezas quando realizamos medições em geral. Algumas recomendações são:

- Utilizar instrumentos de medição calibrados por laboratórios acreditados.
- Efetuar correções para compensar por quaisquer outros erros conhecidos.
- Verificar as medições através de repetição ou de outros tipos de checagem.
- Conferir os cálculos.
- Utilizar instrumentos com uma resolução maior.
- Lembrar que, em uma cadeia de sucessivas calibrações, a incerteza aumenta quanto mais longe estivermos da primeira calibração.
- Obedecer às instruções do fabricante no que diz respeito ao uso e manutenção de instrumentos.
- Utilizar apenas planilhas e/ou softwares validados.
- Anotar os resultados de um ensaio sempre no momento em que eles são obtidos. Nunca passar a limpo um registro de medições.

Síntese

- Erro e incerteza não são sinônimos. Erro é a diferença entre o valor medido e o valor de referência da grandeza que estamos medindo. Incerteza é a quantificação da dúvida sobre o resultado da medição.
- A média aritmética nos fornece uma estimativa do valor “verdadeiro” do mensurando.
- O desvio-padrão de um conjunto de dados nos informa sobre a distância entre cada dado e a média aritmética do conjunto.
- Uma distribuição de probabilidade é uma relação entre o resultado de um experimento estatístico e a probabilidade de sua ocorrência. As distribuições que vimos nesta aula foram a normal e a uniforme.
- A incerteza do tipo A é estimada a partir da distribuição estatística dos valores provenientes de repetidas de medições.
- A incerteza do tipo B é estimada de outra forma que não estatística. Pode ser baseada na experiência de experimentos passados, em certificados de calibração, em especificações de fabricantes, em informações de publicações científicas, entre outros.
- A incerteza-padrão é o intervalo cujo tamanho pode ser pensado como “mais ou menos um desvio-padrão”.

- Incertezas-padrão, sejam elas do tipo A ou do tipo B, podem ser combinadas através de soma quadrática. O resultado dessa soma quadrática é a incerteza-padrão combinada, uc ou uc (y).
- A multiplicação da incerteza-padrão combinada uc por um fator de abrangência k resulta no que chamamos de incerteza expandida U.
- É importante que nossa resposta final contenha as seguintes informações: o resultado da medição e sua incerteza; o fator de abrangência e a probabilidade de abrangência; e a forma como a incerteza foi estimada.

Referências

- BELL, S. A Beginner's Guide to Uncertainty of Measurement – Issue 2. Teddington: NPL, 2011.
- Guia para a Expressão da Incerteza de Medição. Terceira edição brasileira. Rio de Janeiro: ABNT, Inmetro, 2003.
- Portaria Inmetro nº 319, de 23 de outubro de 2009 – Adota no Brasil a nova versão do Vocabulário Internacional de Metrologia – Conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM).
- http://www.igm.mat.br.