

A avaliação da incerteza do tipo B

Segundo o Guia para Expressão da Incerteza na Medição (Joint Committee for Guides in Metrology, 2008a), em condições ideais, todas as incertezas em laboratório seriam avaliadas por procedimentos do tipo A. Como isso nem sempre é possível, é importante introduzir os métodos de avaliação da incerteza do tipo B, que dispensam a análise de estatística de observações repetidas. Geralmente causa algum constrangimento (mesmo aos especialistas da área da Física) o fato de que as avaliações da incerteza do tipo B, muito mais que as avaliações da incerteza do tipo A, dependem fundamentalmente da maturidade, da intuição e do conhecimento que o experimentador tem acumulado sobre seus instrumentos e procedimentos de medição. Contudo, é preciso destacar que avaliações do tipo A e do tipo B, quando executadas corretamente, são igualmente confiáveis na determinação da incerteza de uma medição.

Avaliações da incerteza do tipo B dispensam análise estatística de observações repetidas.

Quando usar uma avaliação do tipo B?

As avaliações da incerteza do tipo B são utilizadas principalmente quando é muito difícil realizar observações repetidas (ou quando não faz sentido realizar tais observações). Com efeito, há vários experimentos em Física que levam várias horas (até dias!) para serem realizados. Também há aqueles que consomem materiais tão caros que não é muito rentável repeti-los. Há também muitas medições que são rápidas e baratas, mas não apresentam variabilidade observável. Por exemplo, considere que desejamos medir o comprimento de um clipe de papel (Figura 7).

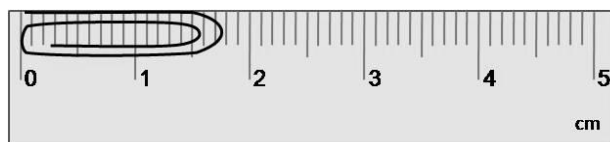


Figura 7. Medindo o comprimento de um clipe de papel com uma régua comum.

Em geral, quando uma pessoa avalia o comprimento de um clipe como esse em,

digamos, 17,5 mm, observando o mesmo clipe uma segunda vez, fará a mesma leitura. Dessa maneira, como uma lista de observações repetidas idênticas não traz nenhuma informação sobre

Algumas medições, quando repetidas, não apresentam flutuação estatística

a confiabilidade dessas observações, não faz sentido realizar uma avaliação do tipo A⁹.

Porém, antes de introduzirmos o procedimento de avaliação da incerteza do tipo B, vamos tentar entender o que está acontecendo com a medida de uma grandeza experimental quando ela não apresenta flutuação estatística perceptível.

Componentes aleatórias e sistemáticas do erro

Em um texto específico sobre os conceitos de erro e incerteza, destacamos que toda a grandeza experimental está sujeita a várias fontes de erro, tais como: calibração do instrumento, condições de uso e armazenamento, interação instrumento-objeto e o efeito de variáveis que não conseguimos (ou não desejamos) controlar. A esse respeito, quando estamos pensando em trabalhar com um conjunto de observações repetidas sob as mesmas condições, faz sentido organizar as fontes de erro em duas componentes chamadas: (1) erro aleatório e (2) erro sistemático.

Erro = Erro Aleatório + Erro Sistemático

Erro aleatório é, por definição, a componente do erro que varia entre observações repetidas sob as mesmas condições. Portanto, o erro aleatório é responsável pelas flutuações estatísticas. Quanto maior for a componente aleatória do erro, maior será chance de observarmos flutuações estatísticas.

O erro aleatório é responsável pelas flutuações estatísticas

Erro sistemático é a componente que não varia entre observações repetidas, alterando sistematicamente o resultado de uma medição sempre no mesmo sentido e da mesma quantidade. Nessa componente de erro, não há flutuação.

⁹ Se insistíssemos em realizar uma avaliação da incerteza do tipo A com uma tabela de dados idênticos, chegaríamos necessariamente a um desvio padrão nulo! Como nenhuma grandeza experimental é completamente confiável, não poderíamos tomar o desvio padrão de um conjunto de dados idênticos como medida da sua incerteza.

Para ilustrar o erro sistemático, considere que a régua com que medimos o clipe de papel (Figura 7), devido a uma imperfeição de fabricação, acrescente um milímetro a cada centímetro de tudo aquilo que ela mede. Dessa maneira, enquanto nossa leitura indica que o clipe possui 17,5 mm, ele possuirá realmente algo em torno de 16,5 mm.

Claro que, quando temos esse tipo de informação em mãos, somos obrigados a fazer uma correção. Ou seja, se soubéssemos que a régua em questão acrescenta *exatamente* um milímetro a cada centímetro, seríamos obrigados a corrigir todas as medidas obtidas com esse instrumento antes de publicá-las. Contudo, mesmo após efetuar tais correções, restará sempre alguma incerteza sobre a resolução, fabricação e calibração dos instrumentos de medida que estamos empregando. Ao lado disso, como é possível perceber, devido ao seu caráter sistemático, algumas componentes da incerteza no comprimento do clipe de papel não poderiam ser avaliadas adequadamente por uma série de observações repetidas desse comprimento¹⁰. Enfim, se a análise de flutuações estatísticas não resolve o problema, o que fazemos para avaliar a incerteza em situações como essa?

Procedimentos do tipo B

Segundo o Guia (Joint Committee for Guides in Metrology, 2008a), avaliações do tipo B devem ser baseadas em toda a informação disponível sobre os instrumentos e procedimentos utilizados. Por exemplo:

- a) dados coletados anteriormente;
- b) experiência ou conhecimento geral sobre o comportamento e propriedades de materiais e instrumentos;
- c) resolução de leitura do instrumento;

¹⁰ É tentador fazer uma correspondência entre erro aleatório e incerteza do tipo A, entre erro sistemático e incerteza do tipo B. Contudo, o Guia (Joint Committee for Guides in Metrology, 2008a) destaca que, em algumas situações, essa correspondência não se sustenta. Por isso, prefere-se classificar a incerteza em função do procedimento usado para determiná-la (estatístico ou não) em vez da natureza sistemática ou aleatória das componentes de erro.

- d) especificações do fabricante;
- e) dados disponíveis em certificados de calibração;
- f) incerteza associada a valores de referência.

Em síntese, a avaliação da incerteza do tipo B consiste em três passos:

- a) Identificar, no conjunto das informações disponíveis sobre procedimentos e instrumentos de medição, aquelas que provavelmente estão relacionadas à produção de incerteza da medição;
- b) Escolher uma distribuição de probabilidades mais razoável em vista das informações disponíveis;
- c) Ajustar os parâmetros da distribuição às informações disponíveis para produzir uma quantidade que possa ser interpretada como desvio padrão.

O terceiro passo é importante porque, tanto em procedimentos do tipo A quanto em procedimentos do tipo B, a incerteza da medição sempre poderá ser interpretada como um desvio padrão. O exemplo a seguir ilustra uma avaliação da incerteza do tipo B, destacando como esse procedimento de avaliação é fundamentalmente dependente de hipóteses que o experimentador lança a partir do seu conhecimento, experiência e intuição.

Exemplo 01: Medições feitas com régua e paquímetro

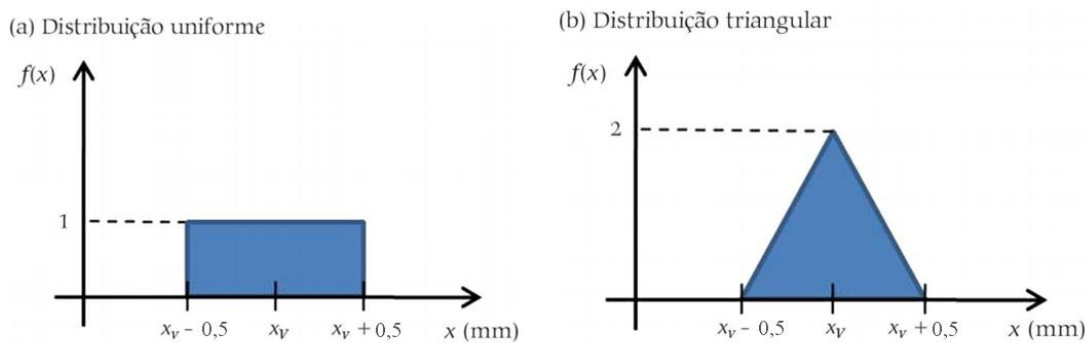
Em primeiro lugar, vamos retomar nosso exemplo da Figura 7, em que desejávamos avaliar o comprimento de um clipe de papel. Apesar de ser muito simples, essa situação é importante porque o argumento desenvolvido para tratá-la pode ser estendido facilmente a qualquer medição que envolva escalas analógicas.

Passo 01 (Identificando informações relevantes). Como é possível perceber, há pelo menos duas informações relevantes que nos permitiriam avaliar a confiabilidade do resultado de medições feitas com instrumentos da família da régua: (1) o material com o

qual é feito esse instrumento (geralmente réguas e paquímetros de plástico são mais deformáveis e são fabricados com calibração menos confiável); e (2) a largura da menor divisão da escala desses instrumentos (na régua, geralmente igual a 1 mm).

Passo 02 (Escolhendo uma distribuição de probabilidades). Além da mais consagrada distribuição gaussiana de probabilidades apresentada em texto anterior (Gráfico 3), existem duas distribuições importantes na literatura (Gráfico 4) eventualmente utilizadas em avaliações da incerteza do tipo B. À esquerda, encontra-se a chamada distribuição uniforme. À direita, a distribuição triangular.

Gráfico 4. Exemplos de distribuições de probabilidade que também podem ser utilizadas na avaliação da incerteza do tipo B.



Como é possível perceber, se compararmos duas distribuições da mesma largura, sendo uma retangular e outra triangular, a distribuição triangular está mais concentrada (menos dispersa) em torno do seu valor médio. Portanto, seu desvio padrão deve ser menor. A saber, os desvios padrão das distribuições retangular e triangular relacionam-se com a largura da base L pelas seguintes expressões:

$$\sigma_{retangular} = \frac{L}{2\sqrt{3}}$$

$$\sigma_{triangular} = \frac{L}{2\sqrt{6}}$$

Em palavras, escolher uma distribuição triangular em detrimento de uma distribuição retangular significa que temos motivos para acreditar que a confiabilidade do dado que

estamos obtendo é maior. Mas como essas propriedades podem nos ajudar na escolha de uma dessas distribuições? Se levarmos em consideração que instrumentos de plástico são menos confiáveis que instrumentos de metal, faz sentido escolhermos a distribuição triangular para estes e a distribuição retangular para aqueles.

Passo 03 (Ajustar parâmetros independentes). O único parâmetro independente das distribuições retangular e triangular é a largura da base. Poderíamos considerar que, apesar das dúvidas que podemos ter sobre o comprimento do clipe de papel (Figura 7), nossa dúvida nunca excede um milímetro. Assim, a largura da base das distribuições (Gráfico 4) podem ser consideradas aproximadamente dadas por $L = 1 \text{ mm}$. Inserindo essa informação nas equações do desvio padrão, obtemos: (1) para medições de um comprimento x com régua de plástico, admitindo-se a distribuição retangular, uma incerteza $u(x) = 0,3 \text{ mm}$; e (2) para medições com régua de metal, admitindo-se uma distribuição triangular, uma incerteza $u(x) = 0,2 \text{ mm}$.

A justificativa para que tradicionalmente se avalie os valores de incerteza, devido à resolução de instrumentos analógicos, pela metade da menor divisão da escala desses instrumentos (0,5 mm no caso das duas régua, ao invés de 0,3 mm ou 0,2 mm) deve-se a um juízo de valor que considera que superestimar uma incerteza é preferível (por ser mais conservador) do que subestimá-la. Como é possível perceber, o processo de avaliação da incerteza do tipo B, muito mais que avaliações do tipo A, pode se tornar bastante especulativo na medida em que exige levantar hipóteses (sempre criticáveis) que se justificam com base em conhecimento, experiência, intuição do experimentador e juízos de valor.

Exemplo 02: Lendo certificados de fabricação e calibração

Como segundo exemplo, considere que o certificado de fabricação de um cilindro metálico informa que ele possui massa igual a 1,000 kg com incerteza expandida em

três desvios padrão de 0,008 kg, portanto ao nível de abrangência de quase 100% (vide o Gráfico 3). Nesse caso, a avaliação é muito simples! Dividimos 0,008 kg por três e recuperamos a informação desejada: o desvio padrão que caracteriza a incerteza sobre a massa do cilindro. Se o fabricante tivesse informado que a incerteza é de 0,008 kg com 95% de abrangência, pressupondo que ele se referia a uma distribuição normal, poderíamos concluir que a incerteza desse valor de massa é aproximadamente igual a 0,004 kg (vide Gráfico 3).

Exemplo 04: Medições com instrumentos digitais

É conveniente procurar no manual do instrumento a informação do fabricante sobre a incerteza da medição. Acontece muitas vezes que tal incerteza, segundo o próprio fabricante, é maior do que a menor diferença possível entre duas leituras do instrumento. Explicando melhor, o visor de um termômetro de infravermelho permite leituras em graus Célsius com um algarismo decimal (por exemplo, 15,7° C), mas o fabricante pode informar que a incerteza é de 0,2° C.

Caso não se tenha tal informação e considerando que nossas avaliações de incerteza devem ser preferencialmente conservadoras (isto é, que persigam uma superavaliação da incerteza ao invés de subavaliá-la) é conveniente adotar a menor diferença possível entre duas leituras do instrumento como tal. Ou seja, em um cronômetro digital que apresente, no visor, um resultado expresso até milésimo de segundo (por exemplo, 3,458 s), adota-se como incerteza 0,001 s.

Considerações finais

Ao contrário do que os exemplos escolhidos neste texto podem sugerir, procedimentos de avaliação da incerteza do tipo B costumam ser bastante rigorosos em contextos que exijam tal rigor. Nossos exemplos foram escolhidos para serem simples de compreender e relevantes a laboratórios de ensino (onde precisão geralmente não é a principal

preocupação). Para uma visão mais completa sobre as avaliações da incerteza do tipo B, recomendamos a leitura dos textos oficiais.