

Erros e incertezas, e dicas sobre relatórios

Flávio C. Cruz – UNICAMP – IFGW
flavio@ifi.unicamp.br

Erros ou Incertezas?

Estas duas palavras serão usadas como sinônimas. Erro expressa incerteza da medida e não significa que a medida está errada.

Toda medida tem incerteza (após ler este texto, imagine o que significaria não ter incerteza !!). Os erros (ou incertezas) são sempre de dois tipos: aleatórios ou sistemáticos; e é importante ficar clara a diferença entre eles.

Por que ? Porque os primeiros afetam a precisão (*precision*) da medida, enquanto o último afeta a exatidão (*accuracy*) da medida. Você sempre deve ser capaz de dizer qual a precisão e qual a exatidão da sua medida. Estes são conceitos que confundem e são em geral mal usados.

Erros aleatórios: em geral se você fizer a mesma medida várias vezes, verá que os resultados obtidos não são os mesmos, embora sejam próximos, e portanto distribuem-se em torno de um certo valor. A causa desta distribuição é aleatória, e daí o nome para este tipo de erro. Para estimar os erros aleatórios, usamos tratamentos estatísticos (média, desvio padrão, etc).

Erros sistemáticos são aqueles que afetam o valor da medida, mas nem sempre são fáceis de identificar. Também não quer dizer que estejam sempre presentes. Muitas medidas simplesmente não possuem erros sistemáticos. Quando eles existem e podem ser identificados, são descontados da medida, ou seja a medida é corrigida. Erros sistemáticos podem vir de instrumentos descalibrados. Por exemplo: uma balança descalibrada vai medir seu peso sempre com um certo erro fixo (para cima ou para baixo). Por outro lado, erros de instrumentos não são as únicas fontes de erros sistemáticos. Por exemplo, o campo magnético da Terra vai afetar o valor do campo magnético medido para uma bobina (e a Terra não faz parte do instrumento de medida). Se eu não souber que a Terra possui um campo magnético, vou pensar que o campo que eu medi para a bobina é seu campo real, o que não é verdade, pois o campo da Terra se soma com o da bobina. Há erros sistemáticos bem mais sutis e sofisticados. Por exemplo, para que o sistema de posicionamento global (GPS) funcione, é necessário que se saiba que há uma diferença na passagem do tempo na região do satélite e na superfície da Terra (porque o satélite se movimenta rapidamente e também porque está em um potencial gravitacional diferente de alguém na superfície, resultados da teoria da relatividade de Einstein). Sem corrigir este “erro sistemático” no tempo que o sinal de microondas leva para chegar do satélite ao seu receptor GPS, o sistema simplesmente não funcionaria, e você não seria capaz de saber sua posição.

Precisão da medida é diretamente ligada ao número de algarismos significativos que são usados para expressá-la. Ex: 263, 435 mm é uma medida mais precisa do que 263, 4 mm. Da mesma forma 263, 40 cm é mais precisa que 263, 4 cm. Por outro lado o número de algarismos significativos da medida depende do erro (aleatório, mas também sistemático se houver) que você estimou para a medida.

Supondo que cada medida acima possa variar por mais ou menos uma unidade na última casa (ou seja que o erro é ± 1 na última casa), a medida 263,40 tem uma precisão aproximada de 1 parte em 10^5 , já que possui cinco algarismos significativos (mais precisamente de $1/26340 = 3.8 \times 10^{-5}$). Já 263,4 tem uma precisão aproximada de 1 parte em 10^4 (ou precisamente $1/2634 = 3.8 \times 10^{-4}$). Portanto duas medidas bastante boas. Geralmente quando você sobe em uma balança, não consegue saber seu peso com esta precisão.

Curiosidade: as medidas mais precisas que se podem fazer hoje em dia têm até 16 algarismos significativos (são medidas de tempo, ou se preferir, frequência).

Um medida pode portanto ser:

- exata e precisa (i.e., com pequeno erro sistemático, e pequeno erro aleatório);
- exata, mas imprecisa (pequeno erro sistemático, mas grande erro aleatório);
- inexata mas precisa (grande erro sistemático e pequeno erro aleatório)
- inexata e imprecisa (grande erro sistemático e grande erro aleatório).

Só se expressam incertezas com um ou no máximo dois algarismos significativos. Se usássemos mais do que isto estaríamos implicitamente supondo que haveria uma incerteza para a incerteza !!!

Ex: $38,5 \pm 0,5$ ou $38,45 \pm 0,53$ ou $38,45783 \pm 0,00005$

Veja que os erros acima permitiram colocar de 3 a 7 algarismos significativos na medida. A precisão da última medida é de 5 partes em 10^7 (ou $5/3845783 = 10^{-6}$, que é muito boa!). Será que você conseguirá fazer uma medida deste tipo neste curso ?

38 ± 1 ou $3,8 \pm 1$

Este erro só permitiu colocar 2 algarismos significativos.

Agora imagine que você fez várias medidas do peso de um objeto e encontrou:

$1,23 \pm 0,01$ kg.

O valor é a média de várias medidas e a incerteza é o desvio padrão desta média.

Porém você percebeu que esta balança estava descalibrada e que sempre media o peso com 187 g a mais. Você determinou que em relação a outras balanças, ela sempre mostrava este valor a mais. Como você expressa o peso do objeto ?

Temos aqui um erro sistemático de $187 \text{ g} = 0,187 \text{ kg}$. Portanto o peso do objeto, subtraindo este erro sistemático, é de $1,043 \text{ kg}$. Porém o erro aleatório de $0,01 \text{ kg}$ só nos permite ir até a segunda casa decimal. Portanto o peso é $1,04 \pm 0,01 \text{ kg}$.

Os erros aleatórios expressam um intervalo de confiança. No caso do desvio padrão, significa que 68 % das medidas caem dentro do desvio (obviamente isto depende do número de medidas. Se você fizer apenas 10 medidas, será impossível ter 6,8 medidas dentro do intervalo !!)

Erro relativo: evitar usar; principalmente se for: $(\text{medida} - \text{valor teórico})/(\text{valor teórico})$. Toda medida física tem uma incerteza, que não tem nenhuma relação com o valor teórico que se espera desta grandeza. A incerteza da medida nunca é expressa em relação ao valor teórico. Quando estimamos a diferença entre o valor medido e o teórico, estamos na verdade testando quão boa a teoria foi em prever o valor experimental. O experimental deve ser capaz de fazer uma boa medida e expressar sua incerteza, de forma que todos poderão confiar em seu resultado.

Fique atento às unidades. Uma boa dica é procurar antes converter todas para o sistema MKS. Assim você pode fazer os cálculos sem se preocupar com as unidades, e simplesmente expressar o resultado final na unidade MKS correspondente.

Relatórios

O relatório deve ser claro e objetivo, permitindo uma primeira leitura rápida. E quem vai ler ? Ou seja, para quem você deve escrever o relatório ? O relatório deve ser escrito para alguém do mesmo nível que você (ex: outro aluno de física experimental), mas que não fez o

experimento ainda. Com tanta informação disponível hoje em dia, seria impossível tentar sempre passar as informações para leitores totalmente leigos, por exemplo. Em uma empresa seu relatório de trabalho será lido por outro profissional do mesmo nível técnico que você. Quando não for o caso, provavelmente você será avisado. O leitor deve ser capaz de, baseado apenas no seu relatório, reproduzir o experimento e os resultados. Mesmo que este não seja o objetivo (imagine experimentos bem mais complexos), no mínimo ele deverá sentir confiança nos seus resultados, a partir do texto do seu relatório. Isto significa que o relatório deve ser auto-consistente, completo e também explícito nas informações passadas. Não deixe pontos para o leitor imaginar ou deduzir, ou pontos de dúvida.

Em ciências exatas o relatório deve ter uma linguagem objetiva e precisa. Embora não seja um romance (!), sua leitura não precisa ser árida.

Apresentação:

- toda tabela, figura ou gráfico deve ter legenda e deve ser citada ou mencionada no texto. Uma figura ou tabela não pode constar em uma comunicação técnica (relatório) e não ser mencionada no texto.

- Todo gráfico deve ter as grandezas dos eixos X e Y claramente escritas, com as respectivas unidades.

- É muito importante que a Conclusão conste como uma seção separada, no final do relatório. É nela que os resultados são resumidos, permitindo a identificação rápida dos resultados obtidos, sem que o leitor precise ler todo o relatório.

Evite comentários genéricos, principalmente na Conclusão.

Exemplo: “Este experimento atingiu os objetivos esperados” ou “os resultados foram plenamente satisfatórios”. Em vez disto, deixar explícito quais foram os objetivos atingidos. De novo: deixe o mínimo para que o leitor tenha de concluir. Coloque seus comentários e conclusões explicitamente, e não deixe que ele tenha o trabalho de inferir.

Perguntas frequentes:

- Quantos “pontos” preciso medir para fazer o gráfico ?

O suficiente para poder fazer uma boa análise estatística (ex: uma regressão linear não se faz com 3 ou 4 pontos). Há um outro detalhe: é importante ter uma idéia prévia do que se espera medir. Se as medidas resultarem em um gráfico com alguma estrutura em uma certa região (ex: medida da ressonância de um circuito RLC, que mostra um pico em uma certa frequência), devemos pelo menos ter alguma idéia da frequência de ressonância, para fazer medidas próximas a ela ou ao longo dela. Caso contrário, mesmo medindo 1000 pontos, corre-se o risco de não se “detectar” a ressonância, e as medidas não mostrarão os detalhes importantes do gráfico. Se não tivermos nenhuma idéia, então provavelmente precisaremos fazer muitas medidas.

- ???