

TEXTO AUXILIAR 2

INTRODUÇÃO AO TRATAMENTO DE DADOS

O objetivo deste texto é expor de maneira simples alguns termos freqüentes no trabalho experimental, para alunos que estão tendo um primeiro contato com o laboratório de física básica. É fundamental que você consulte textos mais detalhados e aprofundados, quando houver necessidade de maior aprofundamento ou quando encontrar dificuldades. Uma pequena bibliografia de referência pode ser encontrada ao final deste texto. No texto, usamos contribuições dos livros citados na bibliografia (especialmente os livros de Meyer e Vuolo), e também dos antigos guias de laboratório de física do Instituto de Física da UFRJ.

1. FAZER UMA MEDIDA

A física tal como a conhecemos (e praticamos) hoje em dia teve origem nos trabalhos de Galileu, no período de 1602 a 1608, a respeito do movimento. Até então, a "filosofia natural" se preocupava com as causas dos fenômenos, e muito pouco com realizar medidas para comparar "o que devia ocorrer" com o que realmente ocorria. Realizar medidas era uma tarefa técnica, de importância menor; um filósofo (o equivalente de um cientista nos dias de hoje) não se ocupava com isto. Galileu começou a realizar medidas para compreender o movimento; ao realizar estas medidas, deparou-se com uma série de problemas práticos, como por exemplo definir uma velocidade que varia no tempo, cujas soluções fundaram o "nascimento de uma nova ciência". Um dos problemas enfrentados, o de realizar uma medida, foi descrito por Stillman Drake¹ da seguinte maneira (versão livre do original):

O último ponto a ser abordado, embora tratar de suas plenas impli-

¹ Stillman Brake, *Galileo*, Coleção Past Masters, Oxford University Press.

cações para a ciência esteja fora de lugar aqui, é que medidas requerem algum tipo de unidade, e que há um limite para a exatidão com a qual medidas podem ser feitas em termos de unidades de contagem e frações destas unidades. Para suas medidas de distâncias percorridas no movimento real, a unidade de Galileu era cerca de um milímetro, e ele não registrou nenhuma fração desta unidade menor que a metade, que é o limite praticável quando se usa uma régua e o olho nu. Não importa como melhoramos as técnicas de medida, sempre existe um limite prático de exatidão, e as pessoas que fazem medidas reais logo percebem isto. O pai de Galileu mostrou como o avanço da prática musical era atrapalhada por teorias que supunham medidas impossivelmente exatas; Galileu viu, quando começou a fazer medidas reais de distâncias e tempos, que discrepâncias com a teoria matemática pura eram intrínsecas ao processo. Assim ele não insistiu no tipo de perfeição que os filósofos sempre tinham exigido, e a ciência de Galileu diferiu da filosofia natural prévia porque era baseada em concordância razoável com a observação em vez de com a mente de Deus ou ideais inacessíveis à experiência, tanto matemáticos (como em Platão) quanto verbais (como em Aristóteles).

Neste texto, vê-se o primeiro problema com que uma pessoa (dentro da concepção atual de ciência) que deseja descrever a natureza se defronta: a realização de uma medida deve expressar um resultado de uma maneira clara, de forma tal que aquele resultado seja compreensível e reproduzível por algum outro experimentador.

Para isto, devemos expressar a medida num sistema de unidades razoavelmente conhecido e padronizado. As unidades de medida que usamos (em geral o Sistema Internacional, SI) estão descritas na bibliografia básica do curso de Física I e de Física Experimental I.

A seguir, vem o problema de expressar o número que representa aquela medida no sistema de unidades escolhido. Em geral, o que interessa não é um número apenas: precisamos dar um número e a exatidão deste número. Isto é, precisamos fornecer uma *avaliação* de quão exata, ou quão próxima de um "valor verdadeiro" está a medida que fizemos. Para isto associamos a cada medida uma "incerteza", expressando-a da seguinte maneira:

período do pêndulo: (1.72 ± 0.07) s

O que queremos dizer com isto é que temos uma confiança — expressa através de uma probabilidade de que isto aconteça — de que a repetição da experiência fornecerá um resultado entre 1.65s e 1.79s.²

Mas por que a indicação da incerteza é tão importante? Suponhamos que a previsão do modelo teórico para o

² A interpretação precisa do significado da incerteza, de acordo com as leis da estatística, será discutida no Texto Auxiliar 3.

período do pêndulo citado seja de $(1,66 \pm 0,02)s$.³

Comparando com o resultado experimental vemos que são consistentes, e podemos afirmar que há concordância da experiência com a teoria. Devemos verificar as fontes de erros em nossa experiência, checar os cálculos teóricos, buscar uma solução. Se tivéssemos apenas os valores de 1,72s para o resultado experimental e 1,66s para a previsão teórica, que conclusão poderíamos tirar?

Em resumo, você deve ter em mente sempre que se você deve determinar através de uma medida alguma grandeza física, ou você fornece um número com a incerteza associada a ele, usando uma unidade apropriada, ou a sua experiência foi inútil.

2. TIPOS DE ERRO

Incertezas experimentais sempre existem. Um dos problemas com que um experimentador se depara é como minimizá-las. Em geral, é mais fácil planejar bem o que se vai fazer do que tentar a posteriori tratar os dados e repetir centenas de vezes a experiência para minimizar o erro do resultado obtido. Então precisamos pensar nas possíveis fontes de erros.

Se chamamos de grandeza experimental toda grandeza cujo valor é obtido por medidas, não conhecemos exatamente seu valor — o *valor verdadeiro*. Tudo que podemos fazer é estimá-lo. É intuitivo que quanto mais vezes repetirmos a experiência, melhor vai ser o resultado final (se fizermos um tratamento adequado dos dados obtidos). Se tivermos a paciência de repetir um número enorme (tendendo a infinito) de vezes a experiência, esperamos que a nossa estimativa do valor verdadeiro corresponda ao valor verdadeiro da grandeza...

A repetição de uma experiência em idênticas condições não fornece resultados idênticos — a menos que seus instrumentos de medida sejam insensíveis a pequenas variações. Experimente medir algumas vezes com um cronômetro o período de um pêndulo simples! Chamamos estas diferenças de flutuações estatísticas em nossos resultados. Por conta destas flutuações, as nossas medidas estão sujeitas a *erros aleatórios*, também chamados *estatísticos*.

Erros sistemáticos são de outro tipo. Eles não podem ser minimizados com a repetição da experiência. Por exemplo, podemos ter um instrumento cuja calibração se alterou com

³ Previsões teóricas também devem conter a incerteza associada, pois as grandezas que aparecem na fórmula teórica (neste caso, a aceleração da gravidade e o comprimento do fio) devem ser medidas de alguma forma e portanto têm uma incerteza associada.

o tempo ou com variações de temperatura, entre outros fatores. Ou você pode estar medindo a altura de uma pessoa, e repetir esta medida em diferentes momentos do dia (em geral ao longo do dia a pessoa "encolhe"). Uma boa experiência reduz na medida do possível ao mínimo as fontes de erros sistemáticos. (Às vezes é bastante difícil usar separadamente os conceitos de erro sistemático e erro aleatório).

Existem outros erros que não vamos nem levar em consideração — aqueles *erros grosseiros*. Quantas vezes você já pegou uma régua e mediu um comprimento começando do 1 da régua, e não do zero? Ou você obviamente estava com uma balança não calibrada (nada em cima dela, e o marcador não indicava zero) e ainda assim você insistiu que seu peso era o indicado no marcador (lojas de comida a quilo...)? Mas não queremos nem pensar que dentro do laboratório você faça este tipo de barbeiragem⁴...

É claro então que a minimização do erro experimental é uma das tarefas mais importantes do laboratório. Um bom físico experimental é aquele que minimiza e estima de forma realística os erros aleatórios de seu equipamento, e que reduz o efeito dos erros sistemáticos de maneira a que eles sejam muito inferiores aos erros aleatórios.

3. PRECISÃO E ACURÁCIA

Os conceitos de *precisão* e *acurada* estão associados às idéias de erros sistemáticos e de erros aleatórios. Um exemplo dado por um (antigo) professor do IF pode nos ajudar a compreender a diferença entre estes termos.

Um jogador de futebol está treinando cobranças de pênalti. Ele chuta a bola 20 vezes, e 20 vezes acerta na trave do lado direito do goleiro. Ele é extremamente preciso — seus resultados não apresentam nenhuma variação em torno do valor que se repete 20 vezes. Em compensação, sua acurada é nula — ele não consegue nenhuma vez acertar o "valor verdadeiro", o gol.

Ou seja, um experimentador é muito preciso quando ele consegue resultados cuja flutuação em torno de um valor médio é pequena. E um experimentador é muito acurado quando sua discrepância em relação ao valor verdadeiro é muito pequeno. Citando o texto de Vuolo (ver bibliografia),

Assim, para ter boa precisão, basta que os erros

⁴ Uma boa discussão sobre tipos de erros está presente no Capítulo 6 do livro de J.H. Vuolo citado na bibliografia.

estatísticos sejam pequenos, de forma que o resultado seja bastante reproduzível quando a medida é repetida. Mas para ter boa acurácia, é necessário que a precisão seja boa e que os erros sistemáticos sejam pequenos.

4. MEDIDAS COM UMA RÉGUA

Comentamos acima que a repetição de uma medida leva à observação de flutuações. A obtenção do *valor verdadeiro* e do *erro* associado a esta medida (definido como a diferença entre o valor obtido e o valor verdadeiro) então pressupõe que se faça, com os valores obtidos, um *tratamento de dados*.

A intuição nos faz acreditar que repetindo muitas vezes a esta medida podemos fazer uma média, e que esta média está mais próxima do valor verdadeiro do que uma única medida. Tratar nossos dados, fazer um *tratamento estatístico de dados*, significa exatamente isto: tomar um conjunto de dados experimentais e tentar descobrir qual o *valor mais provável* e o nosso *desvio* em relação a este valor. Isto é, calcular médias, variâncias, saber o que é uma distribuição, etc. Nenhum desses conceitos implica em grandes dificuldades teóricas ou matemáticas; aos poucos, vamos apresentá-los a você.

No momento, o nosso problema é apenas *medir posições com uma régua milimetrada*. E basta uma reflexão a respeito desta medida.

E claro que se você for cuidadoso nas suas medidas de distância com uma régua milimetrada de boa qualidade, seus resultados não deverão apresentar muitas flutuações. Então, qual é a incerteza associada a esta medida?

Existem alguns fatores de erro envolvidos. Você lê errado, você posiciona mal o zero, etc. Assim, uma boa estimativa da incerteza da sua medida poderia, numa primeira análise, ser pensada da seguinte forma:

"Se eu repetir esta experiência, tenho certeza absoluta que o valor que eu vou obter vai cair dentro da faixa que eu obtive agora."

É isto que queremos que você faça agora, para suas primeiras medidas e com seus primeiros instrumentos de medida. Ao fornecer um resultado como:

medida da largura da mesa: $L = (0.7 \pm 0.1) \text{ m}$

você quer dizer que *existe cerca de 100% de probabilidade de ao repetir a experiência achar o resultado entre 0.6 m e 0.8 m*.

Com isto em mente, podemos fazer nossas medidas iniciais....

Bibliografia

No momento, sugerimos como bibliografia básica para tratamento de dados experimentais:

- Stuart L. Meyer, *Data Analysis for Scientists and Engineers*, John Wiley & Sons, New York.
- J. H. Vuolo, *Fundamentos da Teoria de Erros*, Editora Edgard Blücher, São Paulo.
- Otaviano A.M. Helene e Vito R. Vanin, *Tratamento Estatístico de Dados em Física Experimental*, Editora Edgard Blücher, São Paulo.
- Louis Lyons, *Statistics for nuclear and particle physicists*, Cambridge University Press.