

## MATERIAIS E MÉTODOS

### *PORQUE E COMO ESTUDAR "O PÊNDULO SIMPLES" NO LABORATÓRIO BÁSICO?*

*Maurice Bazin e Pierre Lucía*

*Departamento de Física - PUC/RJ*

Einstein esteve uma única vez no Brasil, numa curta visita na década de 1920. Um político, que o acompanhou durante sua visita ao Jardim Botânico do Rio de Janeiro, pediu-lhe, de brincadeira, que calculasse a altura da palmeira mais velha do Brasil, a "Palma Mater" originária da África. Era um dia ensolarado. Sem hesitação, Einstein olhou para cima e em volta, deu alguns passos e afirmou: "Cerca de 30 metros". O político aplaudiu o que julgou ser o resultado de pura adivinhação...

Einstein também foi visitar o Instituto de Pesquisa Biológica Oswaldo Cruz, onde Chagas e seus companheiros de trabalho estavam investigando o agente da doença que posteriormente tomaria o seu nome. Einstein observou um técnico que trabalhava ao microscópio e ao mesmo tempo desenhava o tripanossomo, usando uma montagem ótica. Virando as costas para os funcionários que o acompanhavam, perguntou ao técnico como podia estar ao mesmo tempo desenhando e observando. O técnico respondeu com orgulho: "Estou usando uma chambre claire universelle". Einstein não se satisfaz com palavras apenas. Pediu ao técnico que lhe cedesse o lugar ao microscópio, e se esforçou em observar e desenhar os animaizinhos. Fez questão de entender como funcionava a chambre claire universelle - a despeito de sua denominação - no mundo físico real (A "câmara clara universal" consiste de um espelho semi-transparente a  $45^\circ$ , e de um segundo refletor também a  $45^\circ$ , o que permite que se veja simultaneamente através do microscópio e sobre o tampo da mesa. Superpõe-se a imagem virtual dada pelo microscópio com a superfície do desenho.).

### *Introdução*

Dentro do esquema classificatório altamente reducionista de uma teoria moderna da aprendizagem, considera-se que os estudantes do curso secundário encontram-se no "nível operacional concreto" de cognição, enquanto que os estudantes universitários atingem o "nível operacional formal" de raciocínio e cognição. Talvez por isso, costuma-

mos dar mais valor ao estágio supostamente mais "adiantado" em que o "pensamento operacional formal é capaz de raciocinar com proposições apenas, não tendo necessidade de objetos"(1).

Essa ênfase, muito divulgada por departamentos de educação, teve a infeliz consequência de reforçar o formalismo nas práticas de ensino no Brasil. As sessões de laboratório são desvirtuadas, ou simplesmente desaparecem; desenhos no quadro negro substituem demonstrações; um pêndulo se torna "a fórmula do pêndulo"... No nosso contexto social, em que o caráter elitista da ciência vai de par com o desprezo pelo trabalho manual (entregue às empregadas), as atividades de laboratório são frequentemente substituídas por "aulas de problemas", que por sua vez transformam-se amiúde em "complementos matemáticos". Havendo aulas de laboratório, pretende-se "verificar" o que se supõe ter sido anteriormente "aprendido" na parte "séria" do curso (as aulas "teóricas"). Distribuem-se rotelros com colunas preparadas: uma para T (10 oscilações); outra para L; a terceira para  $2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$ . Os estudantes preenchem as colunas, devolvem o "relatório" e vão embora, tendo "feito o laboratório".

Estamos trabalhando na elaboração de um programa que se propõe melhorar o ensino de física na universidade. Combatemos a crescente dominação do formalismo suposto "superior". Nosso objetivo é trazer o aluno de volta para a realidade física concreta do mundo que vive. Para tanto, valorizamos a experimentação séria e, quando possível, inserimos as manipulações concretas em laboratório na sua perspectiva histórica. Tentamos fazer com que o estudante viva a experiência de se comportar como um físico.

#### *De Onde Vem o Pêndulo*

O fato de que a própria palavra "pêndulo" foi criada e conservada através dos tempos, de que descreve objetos de aparências tão diversas quanto o pêndulo do relógio de parede da vovó e uma esfera suspensa por um fio preso no teto do saguão da sede da ONU em Nova Iorque, deve refletir a existência de características comuns específicas a tais sistemas, que justifiquem a criação de um nome único para eles.

O estudo experimental do pêndulo no laboratório de ensino perdurou até hoje, não pela simplicidade da "fórmula do pêndulo" ou de sua derivação (embora muitos textos deixem presumir que isso esgote a questão), mas porque o pêndulo esteve intimamente ligado, no curso da história, à busca de avanços técnicos necessários à expansão da cultura européia. Do início do século XVII até meados do século XVIII, muitos cientistas, instigados e encorajados pelas cortes européias, ten-

tavam descobrir meios de "guardar" o tempo no mar, para que as nav<sup>es</sup> comerciais em viagem pudessem determinar a sua longitude. Para saber a longitude do navio, é preciso saber que horas são em Greenwich (no meridiano escolhido como referência) no instante em que se observa o sol atravessar o meridiano do navio (meio-dia local). Naquela época, aquela informação não chegava pelas ondas de rádio. Os governos ofereciam recompensas a quem conseguisse inventar um relógio ao mesmo tempo transportável ("transportaria" o tempo de Greenwich) e preciso. Estavam na liça a França de Henrique IV e mais tarde de Luis XIV, a Espanha de Felipe II, e a Holanda.

Dentro dessa perspectiva, Huygens aperfeiçoou o estudo matemático do isocronismo para o pêndulo, descobrindo as propriedades da cicloide (cerca de 1660). Mas só tinha resolvido o problema "teoricamente". O pêndulo era um bom contador de tempo e regulador de relógio em terra firme; mas como transportá-lo no mar? Já em 1637 um almirante holandês informava Galileu que o uso do pêndulo "não é prático para nossos marinheiros, pessoas rudes, homens apenas superficialmente familiarizados com matemática e astronomia, e que ficam satisfeitos com essas poucas proposições que servem às suas necessidades. Homens que, além do mais, enfrentam dificuldades insuperáveis em usar a vossa descoberta num barco em movimento, continuamente jogado para lá e para cá..."<sup>(2)</sup>

Muitos anos depois, em 1714, Newton foi indicado pelo Parlamento como conselheiro de uma Junta de Longitude, em consequência de uma "Petição feita por Capitães e Mercadores"<sup>(3)</sup>. Essa Junta foi encarregada de estipular recompensas para a "determinação da longitude no mar". O que precisava, dizia Newton, era "um relógio que marque o tempo com exatidão, ... mas em virtude do movimento do navio, da variação de calor e frio, umidade e secura, e da diferença de gravidade e diferença de latitude, tal relógio ainda não foi feito". Na verdade, um tal relógio jamais viria a ser construído a partir de um pêndulo.

A Junta concedeu o prêmio de 20.000 libras esterlinas a John Harrison, um relojoeiro britânico que fabricou o que hoje chamamos de cronômetro marítimo. Esse cronômetro utilizava a inércia de uma roda de balanço em oscilação. Assim, um pêndulo de torção substituiu o pêndulo de gravidade. A massa puramente inercial substituiu a mistura de massa inercial e gravitacional que determina o funcionamento de um pêndulo. As dificuldades indicadas por Newton foram eliminadas (desapareceu a dependência da "diferença de gravidade", bem como as alterações no fio resultantes de mudanças de umidade) ou remediadas (Harrison construiu partes com compensação térmica, utilizando uma grade de

dois metais com diferentes coeficientes de expansão). Podemos dizer que o pêndulo morreu como marcador de tempo na oficina de Harrison, por volta de 1727. O primeiro cronômetro com ponteiros, com seus familiares numerais romanos no mostrador, foi construído por Harrison alguns anos depois. Um modelo aperfeiçoado foi finalmente submetido a um teste de campo (ou melhor, de mar) numa viagem de ida e volta de Portsmouth à Jamaica em 1761, atrasando apenas 5 segundos durante um período total de 81 dias.

### *A Investigação de Medidas de Tempo com Pêndulos*

Considerando esse apelo duradouro do pêndulo como possível marcador de tempo, cogitamos da possibilidade de usá-lo ao estudar as propriedades de um outro pêndulo. Em vez de medir o período de oscilação em segundos (com um cronômetro), podemos usar um pêndulo de referência como marcador de tempo comparativo.

Concebemos um laboratório dividido em duas sessões de duas horas. O objetivo é estudar o conceito de tempo e sua medição, ao mesmo tempo em que se investigam os parâmetros que afetam o funcionamento de um pêndulo.

Cada grupo de estudantes recebe dois pêndulos; um deles é usado como medidor de tempo (isso, por si só, levanta discussões interessantes sobre o significado de "medir" o tempo, enquanto tais questões não são levantadas quando se mede o tempo em segundos com um cronômetro demasiadamente "familiar"). O outro é o pêndulo em estudo (cuja massa, comprimento, amplitude, tipo de suspensão, etc. serão variados).

A tarefa experimental de medir um período em termos de outro revelou-se muito rica em termos pedagógicos; e uma razão básica para isso foi que a metodologia não é um exercício "familiar", e tem de ser concebida e executada a partir da inventividade e iniciativa dos estudantes. Qualquer medição de tempo é sempre referida a um fenômeno periódico. Recordamos que o segundo foi definido como uma pequena fração do período de revolução da Terra sobre o seu eixo, até que se tornou um grande múltiplo do período da luz de uma linha do césio. É, portanto, importante que os estudantes façam medições de tempo para as quais este tipo de operação esteja claramente em evidência.

A discussão entre os estudantes durante esta fase inicial, puramente qualitativa, do trabalho de laboratório leva naturalmente a que se sonde os caminhos culturais e históricos da ciência, pela via humilde das medições de tempo. Quando um de nossos alunos decidiu utilizar seu pulso jugular como relógio de referência enquanto se discutia marcadores e padrões de tempo, tivemos a oportunidade de lhe di-

zer que ele estava reproduzindo um dos procedimentos experimentais do próprio Galileu.

Um aspecto interessante do experimento é a avaliação da precisão das medidas. Duas situações extremas têm interesse no caso:

A primeira ocorre quando o período do pêndulo em estudo é muito diferente do período do pêndulo de referência. Como proceder para obter a precisão máxima nessa situação? É claro que o pêndulo cuja oscilação é a mais lenta deve ser escolhido para dar o "jã" e o "stop" do início e do final da contagem das oscilações. A precisão do resultado fica claramente em evidência: o estudante que conta as oscilações do pêndulo mais rápido obterá um resultado "encaixado" entre os inteiros  $N$  e  $N+1$  oscilações do seu pêndulo para  $N_0$  oscilações do mais lento ( $N_0 < N$ ). A máxima imprecisão relativa é  $1/N$ . (O resultado pode obviamente ser aperfeiçoado, contando meio-períodos do pêndulo mais rápido, soltando o mais lento quando o mais rápido atravessa a vertical, com velocidade máxima, e não na amplitude máxima, etc.) Isso significa que, quando se tenta qualquer medição, sempre se pergunta quantas vezes o menor dos dois intervalos a comparar está contido no maior, e não o inverso! É isso que fazemos, instintivamente, quando expressamos o comprimento de uma bancada de laboratório em termos do número de ladrilhos que ela cobre. Não fazemos o inverso. O mesmo método se aplica à medida dos intervalos de tempo, mas o processo não se elabora tão "naturalmente". No caso dos intervalos de tempo, as razões do procedimento experimental devem ser investigadas e analisadas. Isso é fazer boa física.

A segunda situação extrema ocorre quando os períodos dos dois pêndulos devem ser exatamente iguais. Isso se dá quando da investigação das "leis" sobre a independência da massa e da amplitude. A comparação direta entre os dois pêndulos, introduz o conceito de experimento nulo e sua capacidade de melhorar a precisão de um resultado ou de chegar a algum princípio fundamental de independência testável em grau crescente de precisão (tal como: a aceleração de um corpo que cai é independente da natureza do corpo). Entretanto, os estudantes logo descobrem que para grandes amplitudes a independência do período em relação à massa não pode ser demonstrada por causa do efeito inesperado da resistência do ar. Partirão, então, para amplitudes pequenas, a fim de eliminar esse efeito e descobrir a constância do período, independentemente da massa, para amplitudes pequenas.

### *O Comprimento de um Pêndulo*

É somente próximo ao final da primeira sessão de laboratório

que centramos a atenção dos estudantes no problema da medição do comprimento de um pêndulo em termos do comprimento de referência do pêndulo padrão (como eles fizeram com as medições dos períodos). Pedimos que especifiquem o que chamam de comprimento de um pêndulo simples. Escrevemos no quadro, ou formulamos algumas perguntas:

- Quando se diz que dois pêndulos têm o mesmo comprimento? Como se especifica o comprimento de um pêndulo?

Com dois pêndulos lado a lado, com objetos de diferentes formatos e densidades, a observação e a experimentação levarão a especificar a extremidade inferior do comprimento como um ponto "muito próximo do centro de massa" do objeto. Tomando-se a "base do objeto" ou o seu "topo" como extremidade do comprimento, não se obtém o mesmo período para os dois pêndulos. Essa pergunta foi feita pela primeira vez por Giovanni Pieroni em 1635, quando trabalhava no observatório de Viena, numa correspondência a Galileu: "... seria muito útil para mim saber qual deve ser o comprimento de um pêndulo que bate um ou mais segundos; também saber se esse comprimento deve incluir o tamanho vertical do peso ou ser medido até o centro desse peso." A resposta será da da 30 anos mais tarde por Huygens.

Para medir quantitativamente o comprimento do pêndulo em estudo, os estudantes transferem o comprimento de referência para uma simples fita de papel que eles dobram um número suficiente de vezes para alcançar uma precisão que lhes permita comparar significativamente os resultados de medições de vários comprimentos.

Tendo desenvolvido os modos de efetuar medições, os estudantes deverão sistematizar suas observações e conclusões. Durante a segunda sessão de laboratório, farão o gráfico de  $T/T_0$  versus  $L/L_0$  (em que  $T_0$  e  $L_0$  dizem respeito ao pêndulo de referência), não simplesmente para "fazer um gráfico", mas porque essa pode ser a única maneira pela qual conseguiriam medir o comprimento de um pêndulo inacessível - usado por um experimentador com quem só pudessem comunicar-se por telefone - em termos do comprimento do seu próprio pêndulo padrão. Esse procedimento foi considerado, no século XVII, como uma maneira prática de definir uma unidade universal de comprimento a partir de uma medida de tempo feita com um pêndulo. Em 1631, o holandês Isaac Beeckman propôs escolher o comprimento do pêndulo que bate o segundo: "Deveríamos adotar esse comprimento como referência para medir todos os comprimentos, por ser ele invariável para todos os homens, em qualquer época e em qualquer lugar...". Huygens foi mais longe ainda, propondo especificamente definir um pé como "pé-hora"... O problema surgiu poucos anos depois, quando expedições que mediam o tamanho de um meridiano terrestre descobriram que um dado pêndulo não conservava o mes-

mo período "em qualquer lugar".

Para investigar a forma analítica da dependência entre  $T/T_0$  por um lado e  $L/L_0$  por outro lado, os estudantes calculam os logaritmos correspondentes com suas calculadoras de bolso e os registram em papel de gráfico comum, evitando dessa forma o choque inútil de um contato prematuro com essa esquisitice anacrônica que chamamos de papel log-log.

Esse procedimento experimental, em que um pêndulo é ao mesmo tempo o sistema físico em estudo e o relógio padrão, dará dividendos quando chegar o tempo de os estudantes investigarem as propriedades muito menos óbvias do pêndulo físico, em seus estudos posteriores de mecânica. A insistência em usar um pêndulo simples como marcador de tempo de referência os levará a buscar o isocronismo dos períodos. Isso conduzirá, em última instância, ao conceito de centro de percussão e seu conjugado, o centro instantâneo de rotação.

### *Conclusão*

Esperamos ter esclarecido, através desta descrição de como concebemos um laboratório de física "elementar", que o "nível operacional concreto de cognição" é pedagogicamente rico e provavelmente indispensável para fazer com que os universitários investiguem e conheçam melhor o mundo em que vivem.

Utilizando o pano de fundo cultural, pudemos ressaltar que em muitos casos a física foi elaborada a partir de situações - problemas que eram de interesse para a sociedade num determinado contexto histórico. Dessa maneira, contribuiremos talvez para acabar com duas crenças largamente difundidas: 1) a física é uma atividade privilegiada de mentes puramente teóricas; 2) em consequência da mistificação veiculada pelos meios de comunicação no que toca à atividade profissional dos físicos, a ciência avança por puros processos de pensamento cujos autores são sonhadores teóricos, etéreos e superiores.

Finalmente, esperamos contribuir a familiarizar nossos estudantes com o modo de operação baseado na investigação experimental criativa utilizado até pelos físicos considerados os mais "teóricos", inclusive Einstein.

Nota:- Cópias de roteiros orientadores detalhados para professores, para esta experiência e outras, podem ser obtidas escrevendo aos autores.

### *Referências:*

- (1) J. W. Renner e A. E. Lawson, *Phys. Teach.* **11**, 165 (1973).
- (2) M. C. Robinson, *Am. J. Phys.* **47**, 859 (1979).
- (3) H. W. Turnbull e J. F. Scott, ed. "The Correspondence of Isaac Newton". Cambridge University Press, 1961.