

# Carta do Editor

**R**ichard Philips Feynman é homenageado, nesta edição, pelo centenário de seu nascimento. Considerado o mais importante físico americano do século XX, Feynman deixou relevantes contribuições ao ensino de física, com destaque para os três livros vermelhos *The Feynman Lectures on Physics*, originários de suas aulas para calouros no Instituto de Tecnologia da Califórnia (Caltech) no início da década de 60. Um personagem curioso, o “Grande Explicador” foi um mágico da ciência, notável conferencista e *showman*, envolvendo em aulas e palestras atraentes e inovadoras, não apenas os alunos, mas também os colegas. Como cientista, avançou o conhecimento físico em várias áreas. Teve muita afinidade com o Brasil que visitou inúmeras vezes de 1949 a 1966 quando deu aulas e palestras na universidade e na Academia Brasileira de Ciências, interagiu com a comunidade de físicos, participou de reuniões da SBPC, falou francamente sobre nosso modo de ensinar e aprender física, e aproveitou para se divertir no carnaval carioca. A homenagem começa com a reprodução do artigo *O que é Ciência*, oriundo de uma palestra na reunião da Associação Americana de Professores de Ciências. Nesta, demonstra seu profundo respeito pelos professores, reverencia o pai por despertar sua curiosidade pela ciência, discorre sobre a produção do conhecimento científico e conclui: “A ciência é a crença na ignorância dos especialistas”. O leitor perceberá quão atuais são suas ideias sobre a ciência. A seguir, o Editor aborda algumas de suas incursões no campo da ensinagem, como proponente de metodologias inovadoras e crítico feroz da aprendizagem mecânica e do ensino para testagem, como denunciou em suas palestras no Brasil.

A física quântica contemporânea está presente com um belo exemplo de aplicação de um protocolo de teleporte no contexto do Ensino Médio, descrito por Matheus Lobo e seus colaboradores. Quem disse que não se pode ensinar mecânica quântica no EM?

A história da ciência é contemplada na análise de Breno Moura das contribuições de Benjamin Franklin que vão

muito além da mítica experiência da pipa e nas experiências históricas replicadas com material de baixo custo, com ênfase na garrafa de Leiden, descritas no artigo de Wagner Jardim e Andrea Guerra.

Um olhar nos princípios físicos envolvidos em aparelhos usados no método Pilates é feito por Márcia Lucchese, Guilherme Marranghello e Fábio da Rocha. Diogo de Magalhães e Pinho Alves, em inspirado artigo, relatam a aplicação em sala de aula de uma sequência que usa aplicativos gratuitos para calcular as amplitudes de oscilação das moléculas de ar devido à propagação do som.

A física térmica é abordada em dois artigos. O primeiro, por Wagner Cavalcanti, Karolayne Azevedo e Glaydson de Oliveira, propõe medir a temperatura de lâmpadas incandescentes usando LDR e a placa Arduino. O outro, de uma equipe de estudantes do do Acre, descreve o uso de um jogo de tabuleiro para estudo de termometria.

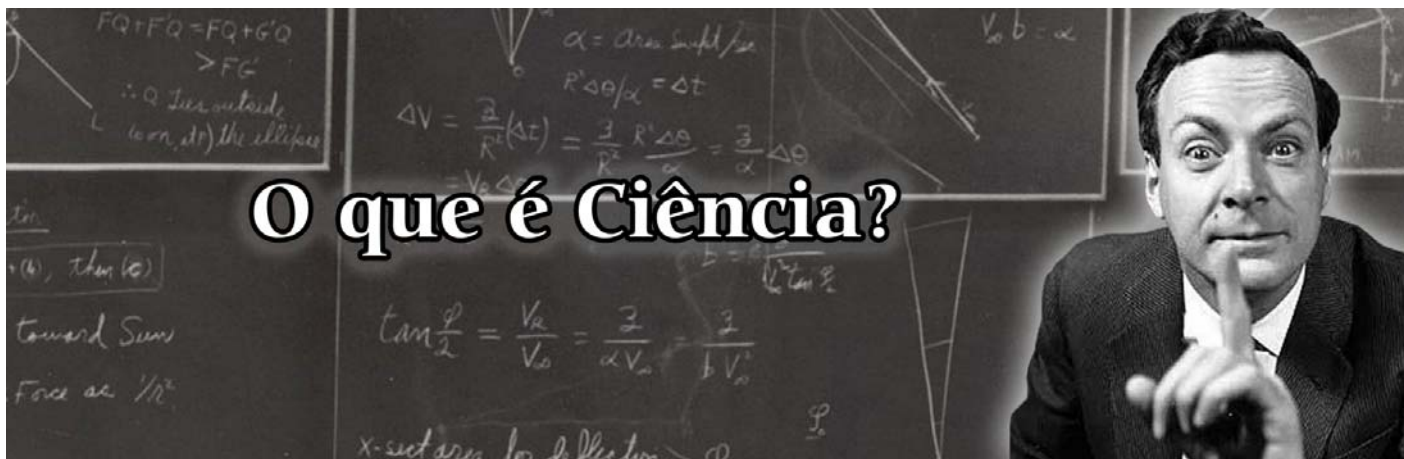
As ideias de Paulo Freire estão presentes em uma atividade investigativa de Itabuna, BA, descrita por Kamila Fonseca e colaboradores, para o ensino fundamental tendo como tema gerador a feira livre.

M. Lopim e equipe apresentam o luxímetro LÚDICO voltado para comparar lâmpadas quanto à sua eficiência energética, mas que pode também se tornar um instrumento didático visualmente atrativo para ensino de diversos conceitos físicos.

A seção Faça Você Mesmo traz dois artigos. No primeiro, Thiago Costa e Usley Cherpinski apresentam um *kit* de baixo custo para medir a eficiência de células fotovoltaicas, desenvolvido para uma atividade de ensino. Por último, Diogo Soga, Doris Kohatsu e Mikiya Muramatsu revisitam os prismas caseiros usados no estudo da refração da luz e propõem novo modelo que descarta as lâminas de vidro e indicam novas fontes de luz e condições propícias que melhoram a visualização do espectro visível da luz.

Uma boa leitura e bom proveito.

Nelson Studart



# O que é Ciência?

.....

**Richard Feynman (1918-1988)**  
 California Institute of Technology,  
 Pasadena, California, USA

**Trad. Marcel Novaes**  
 Universidade Federal de Uberlândia,  
 Instituto de Física, Uberlândia, MG,  
 Brasil  
 E-mail: marcel.novaes@gmail.com

.....

**A**gradeço o Sr. DeRose pela oportunidade de estar com vocês, professores de ciências. Também sou um professor de ciências. Tenho experiência apenas em ensinar alunos de pós-graduação em física e, como resultado dessa experiência, eu sei que não sei ensinar.

Tenho certeza de que vocês, que são verdadeiros professores trabalhando no nível mais baixo dessa hierarquia de professores, instrutores de professores, especialistas em currículo, também têm a certeza de que não sabem fazê-lo; caso contrário nem teriam se incomodado em vir a este encontro.

O tema “o que é ciência?” não foi escolha minha. Foi escolha do Sr. DeRose. Mas eu gostaria de dizer que acho que “o que é ciência” não é equivalente de modo algum a “como ensinar ciência”, e devo chamar sua atenção para isso por duas razões. Em primeiro lugar, pela maneira como preparei esta palestra, pode parecer que estou tentando dizer a vocês como ensinar ciência – e não estou fazendo isso de maneira nenhuma, porque eu não sei nada sobre crianças pequenas. Eu tenho uma, então eu sei que eu não sei. A outra razão é que eu penso que a maioria de vocês (porque ouço dizer e porque há tantos artigos e especialistas sobre o assunto) têm algum sentimento de falta de confiança. Vocês estão sempre ouvindo falar sobre como as coisas não estão indo bem e como deveriam aprender a ensinar melhor. Eu não vou criticá-los pelo mau trabalho que estão fazendo e indicar como ele pode ser melhorado; não é essa a minha intenção.

Na verdade, temos ótimos estudantes vindo para o Caltech e, ao longo dos anos,

eles têm chegado cada vez melhores. Como isso é feito, eu não sei. Fico pensando se vocês sabem. Não quero interferir com o sistema; ele é muito bom.

Dois dias atrás tivemos uma conferência na qual decidimos que não precisamos mais dar um curso de mecânica quântica elementar na pós-graduação. Quando eu era estudante, nem sequer havia um curso de mecânica quântica na pós-graduação; era considerado um assunto muito difícil. Quando eu comecei a ensinar, tínhamos um. Hoje nós ensinamos isso na graduação. E descobrimos agora que não precisamos dar mecânica quântica elementar para estudantes formados em outras instituições. Por que o assunto vai sendo ensinado cada vez mais cedo? Porque somos capazes de ensinar melhor na universidade, e isso acontece porque os estudantes estão chegando com um melhor treinamento.

O que é ciência? É claro que vocês devem saber, se vocês a ensinam. É do senso comum. O que posso dizer? Se vocês não

**Quando eu era estudante, nem sequer havia um curso de mecânica quântica na pós-graduação; era considerado um assunto muito difícil.**

**Quando eu comecei a ensinar, tínhamos um. Hoje nós ensinamos isso na graduação... somos capazes de ensinar melhor na universidade porque os estudantes estão chegando com um melhor treinamento**

souberem, toda edição do professor de todo livro didático oferece uma discussão completa do assunto. Há algum tipo de resumo distorcido, agitado e confuso das palavras de Francis Bacon de alguns séculos atrás, palavras que então eram consideradas profunda filosofia da ciência. Mas um dos

maiores cientistas experimentais da época que estava realmente fazendo algo, William Harvey, disse que o que Bacon achava que era a ciência era a ciência que o Lorde Chanceler faria. Ele [Bacon] falava em fazer observações, mas omitiu um fator essencial, que é o julgamento sobre o que observar e em que prestar atenção.

---

Conferência apresentada no décimo quinto encontro anual da National Science Teachers Association, 1966, em Nova York, e reimpresso a partir de *The Physics Teacher* 7(6), 313 (1968), [Palavras e símbolos entre parênteses adicionados por Ralph Leighton.]

Então a ciência não é o que os filósofos da ciência disseram que é, e com certeza não é o que a edição do professor diz que é. Decidir o que ela é foi o problema que eu me coloquei depois que aceitei dar esta palestra.

Depois de algum tempo, eu me lembrei de um pequeno poema:

Uma centopeia estava quieta e feliz,  
quando um sapo para brincar  
Disse "Por favor, qual perna vem depois  
de qual?"

Isso criou dúvidas de forma tal  
Que ela se distraiu afinal  
Sem saber como andar.

Toda a minha vida eu fiz ciência sem saber o que era, mas o que eu vim dizer a vocês – qual perna vem depois de qual – não posso fazer e, além do mais, temo que, por analogia com o poema, depois que eu for embora não seja mais capaz de fazer pesquisa alguma.

Houve várias tentativas por parte de repórteres de obter uma versão resumida desta palestra; eu a preparei há pouco tempo, então isso era impossível; mas agora posso vê-los sair correndo para escrever uma manchete que diz: "O professor chamou o presidente da NSTA de sapo".

Levando em conta a dificuldade do assunto e minha aversão a exposições filosóficas, farei a apresentação de uma maneira pouco usual. Vou apenas contar a vocês como eu aprendi o que é ciência.

É um pouco infantil. Eu aprendi quando era criança. Tinha a coisa no sangue desde o começo. E quero contar a vocês como isso começou. Pode parecer que estou tentando dizer a vocês como ensinar, mas não é essa a minha intenção. Vou dizer o que é ciência contando como eu aprendi o que é ciência.

Foi culpa do meu pai. Quando minha mãe estava grávida, contam – não testemunhei diretamente a conversa – que ele teria dito: "Se for um menino, será cientista." Como ele sabia? Ele nunca me disse para ser cientista. Ele não era cientista; era um homem de negócios, um gerente de vendas de uma companhia de uniformes, mas ele lia sobre ciência e era apaixonado por isso.

Quando eu era bem pequeno – a história mas antiga de que me lembro – quando ainda comia em um cadeirão, meu pai brincava comigo durante o jantar. Ele tinha trazido um monte de ladrilhos retangulares para chão de banheiro de algum lugar em Long Island City. Nós os

colocávamos em pé, um ao lado do outro, e eu podia empurrar o primeiro e vê-los todos caírem. Até aí, tudo bem.

Depois, a coisa foi evoluindo. Havia ladrilhos de cores diferentes. Eu precisava colocar um branco, dois azuis, um branco, dois azuis e mais um branco e mais dois azuis – eu poderia querer colocar um azul, mas deveria ser branco. Vocês já reconhecem a típica esperteza malandra; primeiro divirta-o com brincadeira, depois lentamente introduza valor educacional.

Bem, minha mãe, que é uma mulher muito sensível, começou a perceber essa malandragem e disse "Mel, por favor deixe a pobre criança colocar um azulejo azul se ele quiser." Meu pai disse "Não, eu quero que ele preste atenção em padrões. É a única coisa matemática que posso fazer nesse nível fundamental." Se eu tivesse que dar uma palestra sobre "o que é matemática", eu já teria respondido. Matemática é buscar padrões (O fato é que essa educação teve um efeito. Tivemos um

teste direto experimental, quando eu fui para a escola. Tínhamos aula de tecelagem naquela época. Eles retiraram; é muito difícil para crianças.

Costumávamos tecer papel colorido em tiras verticais e produzir padrões. A professora ficou tão espantada que enviou uma carta para minha casa para relatar que esta criança era muito diferente, porque eu parecia ser capaz de adivinhar antes da hora qual seria o padrão, e produzia padrões incrivelmente intrincados. Então o jogo de azulejos teve efeito sobre mim).

Gostaria de apresentar outras evidências de que matemática tem a ver com padrões. Quando eu estava em Cornell, era fascinado pelo corpo discente, que parecia ser uma mistura diluída de algumas pessoas sensatas em uma massa de tolos que estudavam economia doméstica etc., incluindo muitas garotas. Eu costumava me sentar na cantina com os estudantes para comer e tentar escutar suas conversas e ver se havia alguma palavra inteligente saindo dali. Podem imaginar minha surpresa quando descobri uma coisa tremenda, ou assim me parecia.

Eu ouvi uma conversa entre duas garotas e uma estava explicando para a outra que se você quer fazer uma linha reta, você deve ir para a direita uma certa fração do quanto você sobe – ou seja, se você se move para a direita a mesma quantidade a cada vez que você sobe, então acaba traçando uma linha reta – um princípio profundo de geometria analítica. Eu não sabia que a mente feminina era capaz de enten-

der geometria analítica.

Ela continuou e disse, "Suponha que há uma outra reta vindo do outro lado e você quer saber se elas se intersectam. Imagine que uma das linhas se move duas casas para a direita para cada casa que sobe, e que a outra reta se move três para a direita para cada uma que sobe, e que elas começam a vinte casas de distância" etc. – Eu fiquei chocado. Ela deduziu onde era a intersecção. Uma garota estava explicando para a outra como bordar meias. Assim, eu aprendi uma lição: a mente feminina é capaz de entender geometria analítica. As pessoas que por anos insistiram (contra toda a evidência em contrário) que os homens e as mulheres são igualmente capazes de pensamento racional podem estar certas. A dificuldade talvez seja que ainda não descobrimos uma maneira de nos comunicarmos com a mente feminina. Se isso for feito da maneira certa, podemos conseguir alguma coisa.

Agora vou passar para a minha experiência como um jovem na matemática. Outra coisa que meu pai me disse – e não posso explicar exatamente, porque era mais uma emoção do que uma informação – é que a razão entre a circunferência e o diâmetro de todos os círculos era a mesma, independentemente do tamanho. Isso não me parecia muito impressionante, mas a razão tinha uma propriedade maravilhosa. Era um número maravilhoso, um número profundo,  $\pi$ . Havia um mistério em torno desse número que eu não entendi muito bem quando jovem, mas era muito legal, e o resultado é que eu procurava por  $\pi$  em toda parte.

Quando eu estava aprendendo na escola como escrever decimais e frações, e como calcular  $3 \frac{1}{8}$ , eu escrevi 3,125 e, achando que havia encontrado um amigo, escrevi que era igual a  $\pi$ , a razão entre a circunferência e o diâmetro do círculo. A professora corrigiu para 3,1416.

Estou contando essas coisas para mostrar uma influência. A ideia de que existe um mistério, de que há algo maravilhoso a respeito do número era importante para mim – não o valor do número. Muito depois, quando eu fazia experimentos no laboratório – quero dizer meu laboratório caseiro, onde eu brincava – não, me desculpem, eu nunca fiz experimentos, nunca; eu só brincava. Gradualmente, através de livros e manuais, eu comecei a descobrir que havia fórmulas aplicáveis à eletricidade que relacionavam corrente e resistência, e assim por diante. Um dia, olhando as fórmulas em algum livro, eu descobri uma fórmula para a frequência de um circuito ressonante que era

$f = 1/2 \pi \sqrt{LC}$ , onde  $L$  é a indutância e  $C$  a capacitância do círculo? Vocês estão rindo, mas eu levava a sério. Pi era uma coisa ligada a círculos, e aqui pi está aparecendo em um circuito elétrico. Onde está o círculo? Aqueles que riram sabem de onde vem isso?

Eu tenho que amar a coisa. Eu tenho que procurá-la. Eu tenho que pensar sobre ela. Então eu percebi que as bobinas são construídas em círculos. E cerca de meio ano depois, descobri outro livro que dava a indutância de bobinas circulares e quadradas, e havia outros pis nessas fórmulas. Comecei a pensar sobre isso novamente e percebi que o pi não vinha das bobinas circulares. Entendo isso melhor hoje; mas em meu coração ainda não sei onde está o círculo, de onde esse pi vem.

Quando eu era bem novo – não sei que idade exatamente – eu tinha uma bola em um carrinho que eu estava puxando e percebi uma coisa, então corri até meu pai para dizer que “Quando eu puxo o carrinho, a bola rola para trás, e quando eu estou correndo e paro, a bola rola para a frente. Por quê?”

Como vocês responderiam?

Ele disse, “Ninguém sabe”. Ele disse, “É algo geral, acontece o tempo todo; tudo que se move tende a continuar se movendo; tudo o que está parado tende a manter essa condição. Se você prestar atenção vai ver que a bola não rola para trás quando você começa a se mover. Ela se move para a frente também, mas não tão rápido quanto o carrinho. O fundo do carrinho alcança a bola, que tem dificuldade em começar a se mover. É chamado de inércia, esse princípio.” Eu corri de volta para verificar e, de fato, a bola não rolava para trás. Ele enfatizou a diferença entre o que sabemos e como o chamamos.

Em relação a essa questão de nomes e palavras, quero contar outra história. Costumávamos ir para as montanhas Catskill nas férias. Em Nova York, as pessoas vão para as montanhas Catskill nas férias. Os coitados dos maridos precisam trabalhar durante a semana, mas eles voltam correndo no fim de semana para ficar com suas famílias. Nos fins de semana, meu pai me levava para caminhar na floresta. Ele sempre me levava em caminhadas, e no caminho aprendíamos de tudo sobre a natureza. As outras crianças, meus amigos, também queriam ir e pediam que meu pai as levasse. Mas ele não queria, porque dizia que eu já estava

mais avançado. Não estou tentando dizer a vocês como ensinar, porque o que meu pai fazia era com uma turma de apenas um estudante; se ele tivesse uma sala com mais de um, ele seria incapaz de fazê-lo.

Então íamos nós dois para nossos passeios pela mata. Mas mães eram tão poderosas naquele tempo quanto são hoje e elas convenceram os outros pais de que deveriam levar seus filhos para passear na floresta. Então todos os pais saíam com todos os filhos para passeios no domingo à tarde. No dia seguinte, segunda-feira, estávamos brincando e esse garoto me perguntou: “Está vendo aquele pássaro no tronco? Qual o nome dele?”

Eu disse, “Não faço ideia.”

Ele disse, “É um sabiá. Seu pai não te ensina muito sobre ciência.”

Eu sorri para mim mesmo, porque meu pai já tinha me ensinado que o nome não diz nada sobre o pássaro. Ele me disse “Está vendo aquele pássaro? É um sabiá, mas na Alemanha é chamado de halsenflugel e em chinês eles o chamam de chung ling e, mesmo que você saiba todos esses nomes, ainda não sabe nada sobre o pássaro – você só sabe algo sobre as pessoas; como elas chamam esse pássaro. Não sabe que o sabiá canta, e ensina seus filhotes a voar, e voa tantas milhas durante o verão através do país, e que ninguém sabe como ele encontra seu caminho” e assim por diante. Há uma diferença entre o nome da coisa e o que ela faz.

O resultado disso é que não consigo me lembrar do nome de ninguém e, quando as pessoas discutem física comigo, às vezes ficam nervosas porque dizem “O efeito Fitz-Cronin” e eu digo “Que efeito é esse?” e não consigo me lembrar do nome.

Eu gostaria de dizer uma palavra ou duas – deixem-me interromper minha pequena história – sobre palavras e definições, porque é necessário aprender as palavras.

Não é ciência. Isso não significa, só porque não é ciência, que não precisemos ensinar as palavras. Não estamos falando sobre o que ensinar; estamos falando sobre o que é ciência. Não é ciência saber transformar graus centígrados em Fahrenheit. É necessário, mas não é exatamente ciência. Da mesma forma, se você está falando sobre arte, não diria que arte é saber do fato que o lápis 3B é mais macio que o lápis 2H. É uma grande diferença. Isso não quer dizer que um professor de arte não

deva ensinar isso, ou que um artista possa passar sem saber disso (Na verdade, você pode descobrir isso em um minuto experimentando; mas essa é uma maneira científica que os professores de arte talvez não expliquem).

Para podermos conversar, precisamos de palavras. Mas é uma boa ideia entender a diferença e é uma boa ideia saber quando estamos ensinando as ferramentas da ciência, como as palavras, e quando estamos ensinando a própria ciência.

Para tornar esse ponto ainda mais claro, vou pegar um certo livro de ciências para criticar, o que é injusto, porque tenho certeza de que com alguma engenhosidade eu poderia achar coisas desfavoráveis para dizer sobre outros livros. Há um livro de ciências que, na primeira lição do primeiro ano, começa de forma infeliz, porque começa passando uma ideia errada do que seja a ciência. Há uma imagem de um cachorro – um cachorro de brinquedo – e uma mão dá corda nele e o cachorro se move. Debaixo da figura, o livro pergunta: “O que o faz se mover?” Depois, há uma imagem de um cachorro de verdade e a pergunta: “O que o faz se mover?” Mais adiante há uma imagem de uma motocicleta e a pergunta, “O que a faz se mover?” E assim por diante.

A princípio, pensei que estavam se preparando para falar sobre o que é a ciência – física, biologia, química – mas não era isso. A resposta estava na edição do professor: a resposta era “a energia faz com que se mova”.

Ora, energia é um conceito sutil. É muito, muito difícil de entender direito. Quero dizer com isso que não é fácil entender energia bem o bastante para usá-la direito, de modo a deduzir algo corretamente usando a ideia de energia – está além do primeiro ano. Seria igualmente correto dizer “Deus faz com que se mova” ou “o espírito faz com que se mova” ou “a mobilidade faz com que se mova.” (De fato, poderíamos também dizer “A energia faz com que pare”.)

Vejam da seguinte forma: *essa é apenas a definição de energia*; está ao contrário. Podemos dizer que quando algo se move é porque tem energia, mas não que o que o faz mover é a energia. É uma diferença bem sutil. É o mesmo com essa proposição sobre a inércia.

Talvez eu possa tornar a diferença mais clara da seguinte maneira: se perguntarmos a uma criança o que faz o cachorro de brinquedo se mover, devemos pensar como uma pessoa comum responderia. A resposta seria que demos corda em uma mola; a mola tenta se restaurar e empurra uma engrenagem.

**Para podermos conversar, precisamos de palavras. Mas é uma boa ideia entender a diferença e é uma boa ideia saber quando estamos ensinando as ferramentas da ciência, como as palavras, e quando estamos ensinando a própria ciência**



Que bela maneira de começar um curso de ciências! Desmonte o brinquedo; veja como funciona. Veja a inteligência das engrenagens; observe as catracas. Aprenda algo sobre o brinquedo, a maneira como ele é montado, a criatividade das pessoas que criaram as catracas e as outras peças. Isso é bom. A pergunta é boa. A resposta é que está um pouco infeliz; porque o que estavam tentando fazer era ensinar a definição de energia. Mas nada foi aprendido.

Imagine que um estudante dissesse, “Eu não acho que é a energia que faz com que se mova”. Para onde a discussão iria a partir daí?

Eu acabei descobrindo uma maneira de testar se foi ensinada uma ideia ou apenas uma definição. Teste da seguinte maneira: você diz, “Sem usar essa nova palavra que você acabou de aprender, tente expressar aquilo que aprendeu com suas próprias palavras.” Sem usar a palavra “energia”, me diga o que você sabe sobre o movimento do cachorro. Você não pode. Então não aprendeu nada sobre a ciência. Isso não é tão ruim. Você pode não querer aprender a ciência logo de cara. Você tem que aprender as definições. Mas para uma primeira lição, será que isso não seria destrutivo?

Eu acho que, para uma primeira lição, dar uma fórmula mística para responder questões é muito ruim. O livro tem algumas outras: “A gravidade faz cair”; “as solas dos sapatos se desgastam por causa da fricção.” O couro do sapato se desgasta porque se esfrega na calçada e os pequenos altos e baixos do chão se prendem a pedaços e os arrancam. Dizer simplesmente que é por causa da fricção é triste, porque não é ciência.

Meu pai lidou um pouco com energia e usou o termo depois que eu já tinha entendido um pouco da ideia. O que ele teria feito eu sei, porque ele fez de fato essencialmente a mesma coisa – porém não com o exemplo do cachorro de brinquedo. Ele diria, “Isso se move porque o sol brilha,” se ele quisesse ensinar essa lição.

Eu diria, “Não. O que isso tem a ver com o sol brilhando? Isso se move porque eu dei corda na mola.”

“E por que, meu amigo, você é capaz de dar corda na mola?”

“Eu me alimento.”

“O que, meu amigo, você come?”

“Eu como plantas.”

“E como elas crescem?”

“Elas crescem porque o sol brilha.”

E é assim com o cachorro.

E a gasolina? Energia acumulada do sol, que foi capturada por plantas e preservada no solo. Outros exemplos sempre terminam no sol. E a mesma ideia sobre o mundo que aquele livro estava tentando passar pode ser reescrita de uma maneira bem estimulante.

**Se vamos ensinar as pessoas a fazer observações, precisamos mostrar que coisas maravilhosas podem advir delas. Eu aprendi assim o que é a ciência: ela é paciência. Se você olha, observa, presta atenção, você recebe uma grande recompensa**

Todas as coisas que vemos se movendo podem se mover porque o sol brilha. Isso explica a relação de uma fonte de energia com outra e pode ser negado pela criança. Ela pode dizer, “Eu não acho que é por causa do sol,” e você

pode começar uma discussão. Então há uma diferença. (Mais tarde eu poderia desafiá-la com as marés, e o que faz a Terra girar, e introduzir algum mistério novamente.)

Esse é apenas um exemplo da diferença entre definições (que são necessárias) e ciência. A única objeção nesse caso particular é que era a primeira lição. Isso deve certamente vir mais tarde, dizer o que é energia, mas não como resposta a uma questão como “O que faz o cachorro andar?” Uma criança deve receber uma resposta de criança. “Abra; vamos dar uma olhada.”

Durante aqueles passeios pela floresta, eu aprendi muita coisa. No caso de pássaros, por exemplo, já mencionei a migração, mas darei outro exemplo sobre pássaros na mata. Em vez de dar nomes a eles, meu pai diria, “Veja, note como o pássaro está sempre bicando as próprias penas. Ele bica muito as penas. Por que você acha que ele bica as penas?”

Eu achei que fosse porque as penas estavam embaraçadas e ele estava tentando alisá-las. Ele disse, “Ok, quando será que as penas se embaraçam, ou como elas se embaraçam?”

“Quando ele voa. Quando ele anda, tudo bem, mas quando ele voa as penas se embaraçam.”

Então ele diria, “Você então deve achar que quando o pássaro acabou de pousar ele vai bicar mais as penas do que quando ele já as arrumou e só ficou andando pelo chão por algum tempo. Bem, vamos ver.”

Nós observamos e, até onde eu pude ver, o pássaro bicava as penas igualmente quer estivesse andando ou imediatamente depois de voar.

Então meu palpite estava errado e eu não conseguia adivinhar a razão verdadeira. Meu pai revelou a razão.

É que os pássaros têm piolhos. Têm uns pequenos flocos que saem das penas, meu pai me ensinou, e o piolho os come. Já o piolho tem um pouco de cera nas juntas entre as partes das pernas e existe um ácaro que vive ali e come essa cera. Esse ácaro tem uma fonte de comida tão boa que não digere muito bem, e expele um líquido que tem muito açúcar e nesse açúcar vive uma pequena criatura etc.

Os fatos não estão corretos; o espírito está correto. Primeiro, eu aprendi sobre parasitismo, um vivendo no outro, que vive no outro, que vive no outro. Segundo, ele depois explicou que sempre que há alguma fonte de alguma coisa que pode ser comida a vida vai aparecer, alguma forma de vida vai achar um jeito de usar aquela fonte; e que cada pedacinho de sobra vai ser comido por alguém.

A mensagem aqui é que o resultado da observação, mesmo que eu não fosse capaz de chegar às últimas conclusões, foi uma jóia rara de resultados maravilhosos. Foi algo maravilhoso.

Imagine que me dissessem para observar, fazer uma lista, anotar, fazer isso, olhar, e eu fizesse minha lista e ela fosse guardada com outras 130 listas em um caderno. Eu aprenderia que o resultado da observação é algo relativamente chato, que não resulta em muita coisa.

Eu penso que é importante – pelo menos foi para mim – que se vamos ensinar as pessoas a fazer observações, precisamos mostrar que coisas maravilhosas podem advir delas. Eu aprendi assim o que é a ciência: ela é paciência. Se você olha, observa, presta atenção, você recebe uma grande recompensa – mesmo que talvez nem sempre. Como resultado, quando eu me tornei um homem mais maduro, eu trabalharia pacientemente, por horas e horas, por anos, em alguns problemas – às vezes muitos anos, às vezes menos tempo; muitos deles fracassaram, muita coisa foi para o lixo – mas mais cedo ou mais tarde havia a riqueza de um novo entendimento que eu tinha aprendido a esperar quando era garoto, o resultado da observação. Porque eu não aprendi que a observação era inútil.

Aliás, lá na floresta eu aprendi outras coisas. Fazíamos passeios e víamos tudo quanto é coisa e falávamos sobre muitas coisas: sobre o crescimento das plantas, a luta das árvores pelo sol, sobre como elas tentavam chegar o mais alto possível, e como resolver o problema de levar água até cem metros de altura, sobre as plantinhas no chão que buscavam um pouquinho de luz que atravessa tudo aquilo, e assim por diante.

Um dia, depois de termos visto isso

tudo, meu pai me levou para a floresta de novo e disse, “Todo este tempo nós olhamos para a floresta e só vimos metade do que está acontecendo, exatamente metade.”

Eu disse, “Como assim?”

Ele disse, “Estivemos observando como todas essas coisas crescem; mas, para cada crescimento, deve haver a mesma quantidade de decaimento – senão, os materiais seriam consumidos para sempre: árvores mortas ficariam lá, tendo usado tudo que podiam do ar e do solo e essas coisas não voltariam para o solo ou para o ar, e nada mais poderia crescer pois não haveria material disponível. Deve haver, para cada crescimento, a mesma quantidade de decaimento.”

Fizemos então vários passeios pela mata, durante os quais quebrávamos troncos velhos e víamos o mofo e os fungos crescendo. Ele não podia me mostrar as bactérias, mas vimos os efeitos de amolecimento e coisas do tipo. Assim, eu vi a floresta como um processo de conversão constante de materiais.

Havia muito disso, descrição de coisas de modo estranho. Ele às vezes começava a falar de coisas assim: “Imagine que um homem de Marte viesse e olhasse para o mundo”. Por exemplo, quando eu estava brincando com meus trens elétricos, ele me contou que havia uma grande roda sendo girada por água e que estava conectada a filamentos de cobre que se espalham e espalham e espalham em todas as direções; e que há pequenas rodas e todas essas pequenas rodas giram quando a grande roda gira. A relação entre elas é apenas que há cobre e ferro, nada mais – não há partes móveis. Você gira uma roda aqui e todas as outras rodas por toda parte também giram, e seu trem é uma delas. Foi um mundo maravilhoso sobre o qual me pai me contou.

Vocês podem estar pensando o que ele ganhou com tudo isso. Eu fui para o MIT. Eu fui para Princeton. Eu voltei para casa e ele disse, “Agora você teve uma educação científica. Eu sempre quis saber uma coisa que eu nunca entendi, e agora, meu filho, quero que você me explique.”

Eu disse sim.

Ele disse, “Eu entendo que eles dizem que a luz é emitida de um átomo quando ele passa de um estado para outro, de um estado excitado para um estado de menor energia.”

Eu disse, “Isso está certo.”

“E a luz é um tipo de partícula, um fóton, acho que eles chamam.”

“Sim.”

“Então, se um fóton sai do átomo quando ele passa de um estado excitado para um estado mais baixo, o fóton tem que estar lá no átomo no estado excitado.”

Eu disse, “Bem, não.”

Ele disse, “Ora, como se pode olhar para isso e pensar que um fóton sai sem ter estado lá no estado excitado?”

Eu pensei por alguns minutos e disse, “Lamento; não sei. Não posso te explicar isso.”

Ele ficou muito desapontado, depois de todos aqueles anos e anos tentando me ensinar alguma coisa, de ver que tudo terminou com resultados tão ruins.

O que a ciência é, eu penso, é algo como isto: Houve neste planeta uma evolução da vida até um estágio em que havia animais evoluídos, que são inteligentes. Eu não me refiro apenas a seres humanos, mas a animais que brincam e que podem aprender algo da experiência – como gatos. Mas, nesse estágio, cada animal tem que aprender por sua própria experiência. Eles se desenvolvem gradualmente, até que algum animal [primatas?] aprende com a experiência mais rápido e pode até aprender com a experiência alheia observando, ou um pode mostrar para o outro, ou ele vê o que o outro está fazendo. Então há a possibilidade de que todos possam aprender, mas a transmissão é ineficiente e eles podem morrer, e talvez aquele que aprendeu morra também, antes de passar aquilo adiante para outros.

A questão é: será possível aprender mais rápido o que alguém aprendeu com algum acidente do que a taxa com que aquilo é esquecido, seja por causa de má memória ou devido à morte do descobridor ou inventor?

Então chegou uma hora, talvez, que

para alguma espécie [humanos?] a taxa de aprendizagem cresceu e alcançou um nível em que de repente uma coisa completamente nova aconteceu: as coisas podiam ser aprendidas por um único indivíduo e passadas adiante tão rápido que não eram perdidas pela espécie. Assim, tornou-se possível um acúmulo do conhecimento da espécie.

Isso foi chamado de estabilidade temporal. Não sei quem foi o primeiro a chamar assim. De qualquer forma, temos aqui [neste salão] alguns exemplos desses animais, sentados aqui tentando ligar

uma experiência à outra, cada um tentando aprender com o outro.

Esse fenômeno de termos uma memória da espécie, de termos um acúmulo de conhecimento transmissível de uma geração para outra, é novo no mundo – mas há uma deficiência nisso: é possível passar adiante ideias que não são úteis para a espécie. A espécie tem ideias, mas elas não são necessariamente úteis.

Então houve um tempo em que as ideias, apesar de acumuladas bem devagar, resultavam da acumulação não só de coisas práticas e úteis, mas grandes acumulações de todo tipo de preconceitos e de crenças estranhas.

Mas uma maneira de evitar essa deficiência foi descoberta, e é duvidar de que aquilo que está sendo passado adiante seja de fato verdade e tentar encontrar novamente *ab initio* da experiência qual é a situação, em vez de confiar na experiência do passado na forma em que é transmitida. E é isso que a ciência é: o resultado da descoberta de que vale a pena verificar com uma nova experiência direta e não necessariamente acreditar nas experiências passadas da espécie humana. É assim que eu vejo. É minha melhor definição.

Gostaria de lembrá-los de coisas que vocês sabem muito bem a fim de dar-lhes algum entusiasmo. Em religião, as lições morais são ensinadas, mas elas não são ensinadas apenas uma vez, você é inspirado de novo e de novo e eu acho que é necessário inspirar de novo e de novo, e lembrar do valor da ciência para crianças, para adultos e para todo mundo, de várias maneiras; não apenas para que nos tornemos cidadãos melhores, mais capazes de controlar a natureza e assim por diante.

Há outras coisas.

Há o valor da visão de mundo criada pela ciência. Há a beleza e a maravilha do mundo que são descobertas através dos resultados dessas novas experiências. Ou seja, as maravilhas das quais eu acabei de lembrá-los; que as coisas se movem porque o sol brilha (Contudo, nem tudo se move porque o sol brilha. A Terra gira independentemente do sol girar, e as reações nucleares recentemente produziram energia na Terra, uma nova fonte. Provavelmente vulcões têm uma fonte de energia diferente do sol).

O mundo é diferente depois que aprendemos ciência. Por exemplo, árvores são feitas de ar, basicamente. Quando elas são queimadas, elas voltam para o ar, e no calor do fogo é liberado o calor do sol que foi fixado para converter o ar em árvore, enquanto nas cinzas está o resto da parte que não veio do ar, que veio da Terra. Isso são coisas belas, e o conteúdo da ciência

cia é maravilhosamente cheio delas. Elas são inspiradoras e podem ser usadas para inspirar outras pessoas.

Outra qualidade da ciência é que ela ensina o valor do pensamento racional, assim como a importância da liberdade de pensamento. Os resultados positivos que advêm da dúvida sobre as lições são verdadeiros. Devemos distinguir – especialmente em ciência – a ciência dos formulários ou procedimentos que às vezes são usados no desenvolvimento da ciência. É fácil dizer, “Nós escrevemos, experimentamos e observamos, e fazemos isto ou aquilo”. Você pode copiar essa fórmula. Mas grandes religiões se dissipam por seguir a forma sem lembrar do conteúdo direto do ensinamento dos grandes líderes. Da mesma maneira, é possível seguir uma fórmula e chamá-la de ciência, mas isso é pseudo-ciência. Assim, nós todos sofremos com o tipo de tirania que temos hoje nas muitas instituições que estão sob a influência de conselheiros pseudo-científicos.

Temos muitos estudos sobre ensino, por exemplo, nos quais as pessoas fazem observações, listas, estatísticas etc., mas isso não se torna ciência estabelecida, conhecimento estabelecido. São apenas um tipo de imitação da ciência análogo aos equipamentos das pistas de pouso dos moradores das ilhas do Pacífico – torres de rádio etc., feitos de madeira. Os ilhéus

esperam que um grande avião vá chegar. Eles até constroem aviões de madeira com o mesmo formato dos que veem nos aeroportos em torno deles mas, estranhamente, seus aviões de madeira não voam. O resultado dessa imitação pseudo-científica é produzir especialistas, o que muitos de vocês são. [Mas] vocês professores, que realmente ensinam crianças no começo do sistema educacional, podem duvidar dos especialistas. De fato, posso definir ciência de outra maneira: *Ciência é a crença na ignorância dos especialistas*.

Quando alguém diz, “A ciência ensina isto e aquilo”, ele está usando a palavra incorretamente. A ciência não ensina nada; a experiência é que ensina. Se lhe disserem “A ciência mostrou isto e aquilo”, você pode perguntar, “Como a ciência mostrou isso? Como os cientistas descobriram? Como? O quê? Onde?”

Não deve ser “A ciência mostrou,” mas “Este experimento, este efeito, mostrou.” E vocês têm tanto direito quanto qualquer um, ao ouvir falar desses experimentos – mas seja paciente e ouça toda a evidência –, de julgar se uma conclusão razoável foi alcançada.

Em um campo que é tão complicado [a educação] que a ciência ainda não foi capaz de chegar a lugar algum, temos de nos basear em algum tipo de sabedoria antiga, um tipo de senso comum. Estou tentando inspirar o professor fundamental a

ter alguma esperança e alguma auto-confiança no senso comum e na inteligência natural. Os especialistas que os estão liderando podem estar errados.

Eu provavelmente arruinei o sistema, e agora os estudantes que chegam no Caltech deixarão de ser bons. Eu penso que vivemos em uma época não-científica na qual quase todo o falatório na mídia e na televisão – palavras, livros etc. – é não-científico. Como resultado, há uma considerável tendência à tirania intelectual em nome da ciência.

Finalmente, em relação à questão da estabilidade temporal, ninguém pode viver além da sepultura. Cada geração que descobre alguma coisa a partir da experiência deve passar isso adiante, mas deve passar adiante com um equilíbrio delicado de respeito e desrespeito, para que a espécie [humana] – agora que ela está a par da deficiência à qual está sujeita – não force seus erros de forma rígida sobre suas crianças, mas passe adiante a sabedoria acumulada e mais a sabedoria de que aquilo talvez não seja sabedoria.

É necessário ensinar tanto a aceitar quanto a rejeitar o passado com um tipo de equilíbrio que exige considerável habilidade. Apenas a ciência contém em si a lição sobre o perigo da crença da infalibilidade dos grandes professores da geração anterior.

Então, vão em frente. Obrigado.





.....

### Nelson Studart

Professor da Universidade Federal do ABC, Santo André, SP, Brasil  
Professor Aposentado Sênior do Departamento de Física, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP, Brasil  
E-mail: n.studart@gmail.com

.....

*Finalmente, gostaria de acrescentar que a principal razão das minhas aulas não foi prepará-los para algum exame – não foi sequer para prepará-los para o mercado de trabalho nem para as forças armadas. Eu queria principalmente que vocês passassem a apreciar o mundo extraordinário e a maneira como o físico olha para ele, a qual, acredito, seja uma grande parte da verdadeira cultura dos tempos modernos. (Provavelmente professores de outras matérias iriam protestar, mas eu acredito que eles estão totalmente errados.) Talvez vocês não apenas passem a apreciar essa cultura, mas é possível que queiram se juntar à maior aventura jamais iniciada pela mente humana.*

R.P. Feynman  
Epílogo do Volume III das *Lectures*, 1963

### Introdução

Uma questão, do tipo quebra-cabeça, foi apresentada a Feynman quando cursava o ensino secundário [1]: Dois ciclistas, 20 km de distância um do outro, correm a 10 km/h. Nesse mesmo momento, uma mosca deixa a roda da frente da bicicleta e voa na direção da outra a uma velocidade constante de 15 km/h. Quando pousa na roda da frente da segunda bicicleta, ela imediatamente se vira e retorna. Quando toca a primeira bicicleta, imediatamente inverte o sentido.

Qual é a distância total coberta pela mosca antes de ser esmagada pela colisão entre as rodas das bicicletas? A resposta imediata de Feynman: 15 km. Raciocínio: como as bicicletas vão colidir em exatamente uma hora, e como a mosca está se movendo a 15 km/h, o total do percurso é 15 km. Uma solução, digamos ortodoxa, apresentada por John von Neumann, consiste em somar a série infinita, obtida a partir do cálculo sequencial da distância na primeira viagem, na segunda e assim por diante (foi essa que tentei!). Esse exemplo ilustra bem como a mente de Feynman funciona na solução de pro-

blemas de física aos quais se dedicou durante sua brilhante carreira. Os famosos diagramas de Feynman foram uma maneira engenhosa de realizar cálculos complicados da eletrodinâmica quântica (QED) de forma simples e eficiente e que simplificaram elegantemente a complexidade de cálculos em outras áreas da física [2]. Não houve problema aberto de física no século XX para o qual Feynman não tenha buscado soluções, algumas bem sucedidas, outras sem êxito, como sua frustrada tentativa de elaborar a teoria da supercondutividade. E sempre abordou os problemas já resolvidos de forma original e inovadora, basta

**Os famosos diagramas de Feynman foram uma maneira engenhosa de realizar cálculos complicados da eletrodinâmica quântica de forma simples e eficiente e que simplificaram elegantemente a complexidade de cálculos em outras áreas da física**

ver os livros editados a partir de suas notas de aulas. Quando inquirido sobre a opinião de Feynman acerca de sua teoria alternativa das “variáveis ocultas” na mecânica quântica, após encontro deles no Brasil, David Bohm comentou que Feynman não encontrara nela um problema a ser resolvido. Não se interessava muito por filosofia (tinha a sua própria), história e áreas das ciências humanas; seu foco principal eram as ciências físicas. Registrem-se os comentários de professores de Princeton acerca da admissão de Feynman, como narrado por

Feynman é um ícone da física no século XX. Sua personalidade multifacetada, seu carisma e suas contribuições à física e ao ensino tornaram-no muito conhecido do grande público e de toda a comunidade de professores de física. Seu apreço e admiração pelo Brasil, país que visitou em várias oportunidades, foi enorme. Em carta ao amigo Leite Lopes, assinou como no título acima. Neste artigo, em comemoração ao centenário de seu nascimento, comento brevemente aspectos de sua vida e obra e destaco a apreciação de alguns colegas mais próximos. Abordo suas principais incursões no campo da ensinagem, como proponente de metodologias inovadoras e crítico feroz da aprendizagem mecânica e do ensino para testagem. Em particular, exponho suas ideias sobre o ensinar e o aprender, sua visão da física, as palestras sobre o ensino no Brasil e os livros *Lições da Física* e *Sobre as Leis da Física*.



seu orientador, John Wheeler [3]: “Vejam as notas desse sujeito do MIT nos testes de aptidão em matemática e física. Fantástico! Ninguém que está se candidatando, aqui em Princeton, chega assim tão perto do pico absoluto.” Alguém no Comitê de Admissão de Pós-graduandos interrompeu: “Ele deve ser um diamante bruto. Nunca deixamos entrar ninguém com notas tão baixas em história e inglês. Mas veja a experiência prática que ele teve em química e ao trabalhar com atrito.”

Em 2018 é comemorado o centenário de nascimento de Richard Phillips Feynman, um dos mais renomados físicos do século XX e considerado, por muitos, o mais importante físico norte-americano da história. Seus colegas atribuem a ele uma mente quase sobre-humana [4], acima da categoria gênio. Segundo Marc Kac: “Um gênio comum é um sujeito que você e eu seríamos tão bons quanto, se fôssemos apenas muitas vezes melhores. Não há mistério sobre como a sua mente funciona... É diferente com os mágicos [...] o funcionamento de suas mentes é, para todos os efeitos, incompreensível. Mesmo depois de entendermos o que eles fizeram, o processo pelo qual eles fizeram é completamente obscuro [...] Richard Feynman é um mágico do mais alto calibre.” Hans Bethe complementa: “Aquele que faz coisas que ninguém mais poderia fazer e que são completamente inesperadas”. Freeman Dyson: “A mais original mente de sua geração.” Seu grande competidor e colega no Caltech, Murray Gell-Mann: “As ideias de Richard, muitas vezes poderosas, enge-

nhosas e originais, eram apresentadas de uma maneira direta que eu achava inspiradoras.” Leite Lopes, seu anfitrião no Brasil: “A imagem que guardo dele é a imensa alegria em fazer pesquisa, em pensar e descobrir por si mesmo de modo inimitável, uma singular intuição, uma rica imaginação que forneceram muitas bonitas dádivas ao conhecimento físico” [5].

São inúmeros os epítetos a ele atribuídos: *showman* nato, bufão, iconoclasta, além de gênio e mágico. Gosto de *Persönagem curiosa* (subtítulo de sua autobiografia) [6]: exibia comportamento exclusivamente não convencional e se descrevia como “ativamente irresponsável” (pode-se fazer várias leituras dessa sua descrição). Demonstrou um amor intenso pela física, mas também tinha paixão por tocar bongôs e frigideiras, desfilar no carnaval carioca, pintar quadros (Fig. 1) e desenhar figuras humanas, decifrar segredos de cofres e aprender novas línguas (incluindo os hieróglifos maias). Sem dúvida, um contador de histórias, inclusive em suas festejadas aulas e conferências. Assim, Gell-Mann provocativamente se manifestou: “Ele se cercou de uma nuvem de mitos e gastou muito tempo e energia gerando anedotas sobre si mesmo” [7].

Sua extrema curiosidade acerca do mundo lhe permitiu fazer conexões que uma mente estreita não pode alcançar. Como salientado pela revista *The Scientist* em seu obituário: “Aristóteles, em *De Poetica*, observou que a habilidade de fazer tais conexões por meio do pensamento metafórico é ‘um sinal de genialidade [...]

implica uma percepção intuitiva da semelhança entre diferentes’. Ele continua a dizer que essa capacidade ‘não pode ser aprendida com os outros’. De fato, esse, como Feynman, era autodidata”. Essa habilidade está clara, para nós professores, na reformulação da física, com as conexões entre campos do conhecimento físico, como ele os compreendia, no originalíssimo *Feynman Lectures on Physics (Lições de Física)* [8].

Em suma, Feynman foi um cientista que conseguiu reunir as qualidades de curiosidade, criatividade, originalidade e uma intuição apurada.

As contribuições de Feynman foram de grande relevância em várias áreas da física e o fizeram merecedor do Prêmio Nobel de 1965 (compartilhado com Julian Schwinger e Sin-Itiro Tomonaga) pelo desenvolvimento da teoria da eletrodinâmica quântica, que unificou o eletromagnetismo, a mecânica quântica e a relatividade restrita. Publicou trabalhos importantes na física das partículas elementares (teoria de interações fracas, jatos de quarks, pártons), na mecânica quântica (formalismo de integrais de caminho, dissipação quântica), gravitação quântica e relatividade geral (ondas gravitacionais), e na física da matéria condensada (hélio líquido e pólaçons). Em duas conferências, lançou as bases da nanotecnologia e da computação quântica. Mas lamentou não ter resolvido o problema da supercondutividade. O volume 40, n. 4 da *Revista Brasileira de Ensino de Física (RBEF)* apresenta uma Seção Especial em homenagem a Feynman por ocasião do centenário de seu nascimento, trazendo a visão de pesquisadores brasileiros sobre sua obra [9](Fig. 2).

### Professor Feynman

Feynman é considerado um dos grandes professores de física de todos os tempos. Seu epíteto “Grande explicador” lhe faz justiça. Suas palestras atraíam grandes audiências e várias foram gravadas e impressas. Destaco as magistrais *Messenger Lectures*, disponíveis na internet, que se transformaram no livro *The Character of Physical Law (Sobre as Leis da Física*, na versão brasileira) [10]. Gostava de dar aulas e conversar com jovens estudantes. E demonstrou muito respeito aos professores de ciências que talvez o vissem como a seu pai, a quem atribui o estímulo a sua curiosidade na infância. Na palestra *O que é ciência*, apresentada nesta edição de FnE, Feynman demonstra seu apreço pelos professores do nível elementar:

“Mas eu gostaria de dizer que acho que “O que é ciência” não é equivalente de modo algum a “como ensinar ciência”,

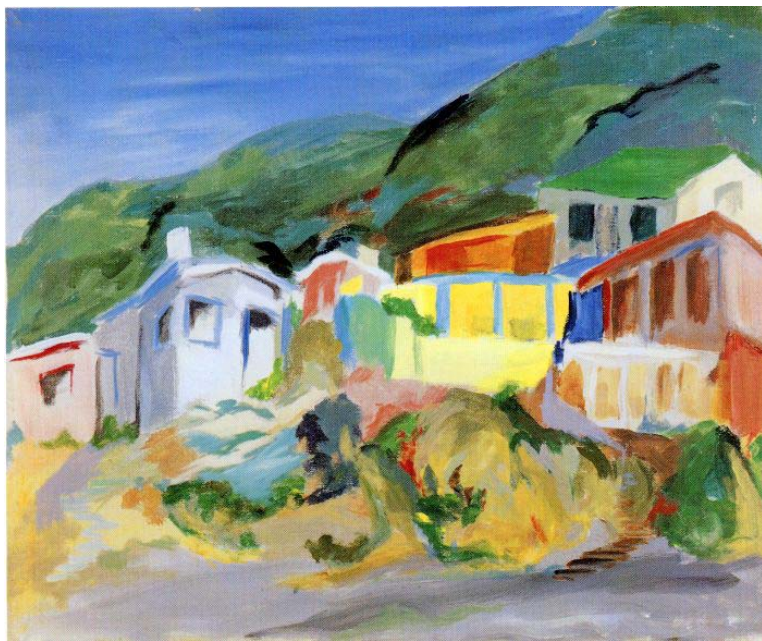
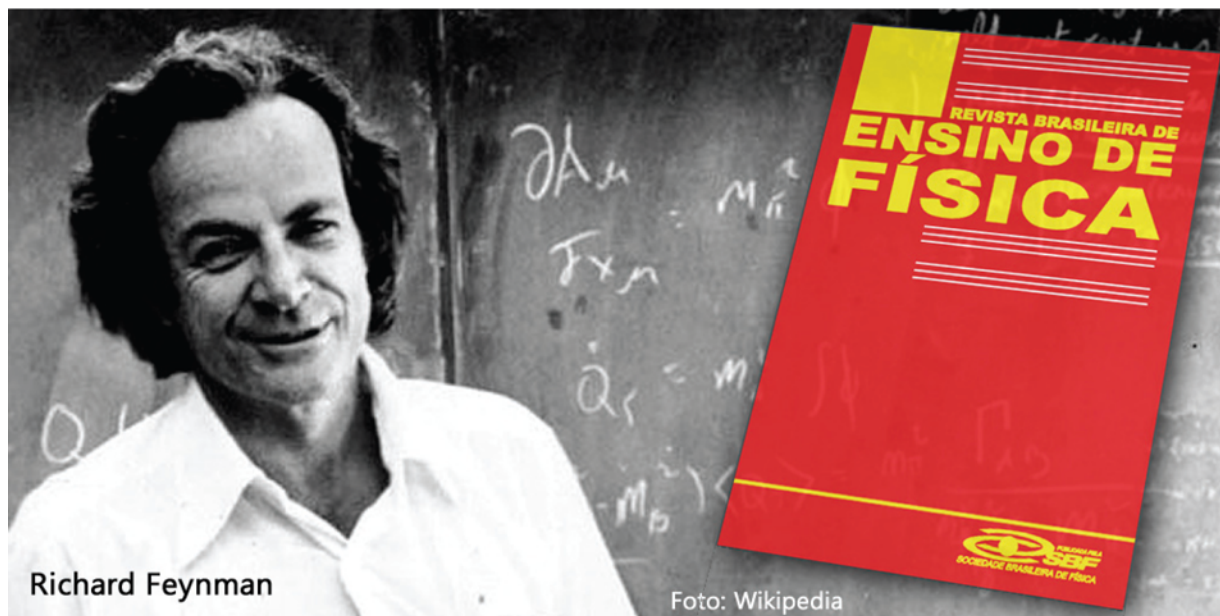


Figura 1: Pintura *Hillside City*, de Feynman, que assinava seus quadros e desenhos com o pseudônimo de Ofey (Museum Syndicate).



Richard Feynman

Foto: Wikipedia

Figura 2: Feynman e a Seção Especial da RBEF que o homenageou no centenário de seu nascimento (vol. 40, n. 4, 2018).

e devo chamar sua atenção para isso por duas razões. Em primeiro lugar, pela maneira como preparei esta palestra, pode parecer que estou tentando dizer a vocês como ensinar ciência – e não estou fazendo isso de maneira nenhuma, porque eu não sei nada sobre crianças pequenas. Eu tenho uma, então eu sei que eu não sei. A outra razão é que eu penso que a maioria de vocês (porque ouço dizer e porque há tantos artigos e especialistas sobre o assunto) têm algum sentimento de falta de confiança. Vocês estão sempre ouvindo falar sobre como as coisas não estão indo bem e como deveriam aprender a ensinar melhor. Eu não vou criticá-los pelo mau trabalho que estão fazendo e indicar como ele pode ser melhorado; não é essa a minha intenção.”

David Goodstein, seu colega e colaborador (apresentador da série *Universo Mecânico*), descreve Feynman na sala de aula [11]: “Para Feynman, o auditório era um teatro, e o conferencista era um artista, responsável por fornecer drama e explosão, além de fatos e números. Isso era verdade independentemente de seu público, se ele estava falando com estudantes de graduação ou pós-graduação, para seus colegas ou o público em geral. Suas aulas eram ilustradas com expressões gestuais e corporais [falava com o corpo], humor e histórias pessoais de seu relacionamento com outros físicos.” Nestor Caticha, do IF-USP, seu aluno em disciplinas da pós no Caltech, comenta [12]: “assistir aula de Feynman era uma experiência única [...] Além da beleza da física que em

si já seria suficiente, nós éramos envolvidos pela trama [que nos contava] [...] “Ter uma interação, por menor que seja, com alguém assim é uma grande experiência. A mensagem diária era sobre a importância da curiosidade, de conviver honestamente com a dúvida, de não ter medo das dificuldades e se divertir fazendo ciência.”

O método de ensinagem (ensino com aprendizagem) de Feynman, ao final dos anos 1940 em Cornell, explorava a criatividade e a originalidade do aluno de forma pouco convencional até para os dias de hoje, com tantas propostas de metodologias ativas. Laurie Brown, que foi orientado por Feynman e cursou várias disciplinas que ele ministrou, relembra [4]:

“Feynman era um professor muito popular e suas aulas em cursos avançados eram bem frequentadas por teóricos e experimentalistas. Depois das aulas, os alunos reuniam-se em pequenos grupos para comparar suas anotações de aula e para refazê-las. Embora as aulas fossem bem preparadas, nem sempre eram fáceis de seguir. Logo descobrimos que os métodos de Feynman eram tudo, menos triviais, e não encontrados em nenhum livro, e que alguns de seus pontos de vista eram grandemente não convencionais. Feynman enfatizava a criatividade – o que para ele significava resolver as coisas desde o começo. Ele pedia a cada um de nós que criasse seu universo de ideias, para que nossos produtos, mesmo que fossem apenas propostas a problemas de classe, tivessem seu próprio caráter original –

assim como seu próprio trabalho carregava o selo único de sua personalidade. Obviamente, esse tipo de ensino se estende muito além da física ou mesmo da ciência em geral. Era incrivelmente diferente do que a maioria de nós aprendeu anteriormente.”

No prefácio de suas *Lectures* [8], Feynman questiona o sistema tradicional de aula expositiva com resolução de problemas, propondo uma metodologia mais interativa do professor com o aluno:

“Acredito porém que não há solução para esse problema de ordem educacional [fracasso dos alunos nos exames] a não ser abrir os olhos para o fato de que o ensino mais adequado só poderá ser levado a cabo nas situações em que houver um relacionamento pessoal direto entre o aluno e o bom professor – situações nas quais o estudante discuta as ideias, reflita e converse sobre elas. **É impossível aprender muita coisa simplesmente comparecendo a uma palestra ou mesmo limitando-se a resolver os problemas determinados**” (grifo nosso) [8, p. 8].

### Como aprender, segundo Feynman

Feynman desenvolveu uma maneira peculiar de aprender. Segundo seu biógrafo, James Gleick [13]:

“Ele abria um caderno novo. Na página do título, escrevia: Caderno de coisas que eu não sei. Nem pela primeira, nem pela última vez, ele reorganizava sua



conhecimento. Trabalhava durante semanas desmontando cada ramo da física, lubrificando as partes e juntando-as novamente, olhando o todo, aparando arestas e procurando inconsistências. Tentava encontrar a essência de cada assunto.”

Desse modo, Feynman antecipa dois processos importantes da teoria da aprendizagem significativa (TAS) de David Ausubel: a diferenciação progressiva e a reconciliação integradora. A diferenciação progressiva é o processo de atribuição de novos significados a um determinado conceito de forma que resulte no uso desse conceito para dar significado a novos conhecimentos. A reconciliação integradora é um processo dinâmico reestruturador da estrutura cognitiva, simultâneo ao da diferenciação progressiva, que consiste em eliminar diferenças aparentes, resolver inconsistências e integrar significados, como abordado por Feynman em seu processo de aprendizagem. [14]

Outros fatores importantes na ensinagem são a simplicidade e clareza na apresentação dos conteúdos. Achava que se o professor não conseguisse com que os alunos compreendessem uma ideia, conceito ou proposição, é porque o professor não a entendeu realmente. Algo que se relaciona com o pensamento de Jerome Bruner [15]: “qualquer tema se poderia ensinar a uma criança em qualquer idade e de uma forma que seja honesta”. Provocado se uma criança poderia entender cálculo diferencial, Bruner retrucou que isso não, mas o conceito de limite, base do cálculo, poderia ser apreendido por uma criança. Em suas *Lectures*, Feynman, ao explicar o conceito contraintuitivo de velocidade instantânea segue Bruner, apontando a necessidade de considerar intervalos de tempo muito pequenos, e chega ao conceito de limite, antes da definição de derivada, como usual nos livros-texto tradicionais (Fig. 3).

No entanto, ao contrário de usar a máxima de Ausubel de que “o fato isolado mais importante na aprendizagem é aquilo que o aprendiz já conhece. Descubra o que ele sabe e baseie os seus ensinamentos nisso”, e trabalhar com os conhecimentos prévios do aluno, Feynman prefere identificar os interesses mútuos do professor e do aluno: “Em primeiro lugar, descubra por que quer que os alunos aprendam e o que quer que saibam e o método resultará mais ou menos por senso comum” (Ref. [8, p. xii]). Por meio de exposição simples, clara e instigadora, conseguia a atenção dos alunos, despertando o interesse deles em aprender.



Figura 3: Feynman, em suas *Lectures*, usa a ideia de intervalos muito pequenos na discussão preliminar do conceito de velocidade instantânea.

### Feynman e o ensino no Brasil

Feynman visitou o Brasil em várias oportunidades entre 1949 e 1966 (Fig. 4). Apareceu na mídia em apoio aos colegas na consolidação do recém-criado Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), enaltecendo as aplicações do laser, e no protesto contra a perseguição a físicos

brasileiros após o golpe de 64. Deu aulas de graduação e pós e realizou pesquisas, usando radioamadores para obter acesso a dados de laboratórios americanos.

E se divertiu muito: desfilou de marinho no bloco “Farsantes de Copacabana”, aprendeu a tocar frigideira e outros instrumentos de percussão e participou de bailes do carnaval carioca. Em entre-



Figura 4: Foto autografada de Feynman e seus colegas no Rio. Na direção da parte da frente para a de trás da mesa. Lado esquerdo: Roberto Salmeron, Gabriel Fialho, Francisco Oliveira Costa, Gerard Hepp, Álvaro Diffini, César Lattes, Antonio José da Costa Nunes, Ugo Camerini, José Leite Lopes, Paulo Emídio Barbosa e Homero L. César. Lado direito: Homero Brandão, Henry British Lins de Barros, Nelson Lins de Barros, Neusa Amato (neé Margem), Richard Feynman, Elisa Frota-Pessôa, Guido Beck, Helmut Schwartz Jayme Tiomno, Reinhard Oehme e George Rawitscher (Caltech Archives).



vista ao *Jornal do Brasil* (24 de fevereiro de 1966), Feynman enfatiza que seu temperamento alegre e sua falta de inibição não são incompatíveis com a seriedade de um cientista: “Não há relação entre o divertimento e o trabalho, e, por isso, não vejo dificuldade em conciliar as duas coisas. Quando estou trabalhando em meu laboratório sou um homem sério e responsável, embora goste de contar histórias engraçadas quando pronuncio conferências para quebrar um pouco a aridez da exposição. Fora do ambiente de trabalho, procuro me divertir (Fig. 5), por achar que um professor e cientista, quando procura manter uma máscara de seriedade, na maioria das vezes está escondendo ignorância.”

E falou sobre ensino de física no Brasil e na América Latina. Em maio de 1952, proferiu palestra sobre ensino de física na Faculdade Nacional de Filosofia que causou enorme impacto na comunidade de físicos. Em junho de 1963, discursou na I Conferência Interamericana de Ensino de Física. Ildeu de Castro Moreira [16] descreveu em detalhes essas duas conferências sobre ensino no Brasil. Segundo Leite Lopes, a palestra foi dada, a pedido dele, após discutir a estrutura do sistema educacional brasileiro e mostrar alguns livros brasileiros para estudantes do ensino secundário. A sugestão foi que ele “criticasse extensivamente esses livros” [5]. Porém, Feynman foi muito além, fazendo ácidas críticas ao sistema de ensino de física no Brasil, em especial sobre as atitudes dos

alunos na aprendizagem e o livro didático do ensino secundário.

Seguem alguns trechos de seu livro de memórias [6] que mostram, com certo sarcasmo, suas impressões sobre a experiência de ensinar no Brasil.

### **Sobre a aprendizagem**

“Eu descobri um fenômeno muito estranho: eu podia fazer uma pergunta, que os estudantes respondiam imediatamente. Mas na próxima vez que eu fizesse a pergunta – o mesmo assunto, e a mesma pergunta, até onde eu conseguia expressar – eles não respondiam nada! Depois de muita investigação, eu finalmente descobri que os alunos tinham memorizado tudo, mas eles não sabiam o que tudo significava [...] Tudo era totalmente decorado, mas nada era traduzido em palavras que fizessem sentido. Outra coisa que nunca consegui fazer com que fizessem foi perguntas [...] Todos fingem que sabem, e se um aluno admite por um momento que algo está confuso, fazendo uma pergunta, os outros assumem uma atitude arrogante, agindo como se não fosse confuso, dizendo que ele está perdendo tempo. Expliquei o quanto era útil trabalhar em conjunto, discutir as perguntas, conversar sobre o assunto, mas eles também não fazem isso, porque a máscara cairia se tivessem que perguntar a outra pessoa. Lamentável! Eram pessoas inteligentes que faziam todo o trabalho, mas entraram nesse estado de espírito engraçado, esse tipo estranho de autopropagar a “educa-

ção” que é sem sentido, completamente sem sentido. “Eu não conseguia ver como alguém poderia ser educado por esse sistema autopropagante no qual as pessoas passam nos exames e ensinam outras pessoas a passar nos exames, mas ninguém sabe de nada. No entanto”, eu disse, “devo estar errado. Havia dois alunos da minha turma que se saíram muito bem. Assim, deve ser possível que algumas pessoas funcionem nesse sistema, por pior que seja.”

### **Sobre o livro didático**

“Não há resultados experimentais mencionados em nenhum lugar deste livro, exceto em um lugar onde há uma bola, rolando um plano inclinado, em que se diz até onde a bola chegou após um segundo, dois segundos, três segundos e assim por diante. Os números têm “erros”, ou seja, se você olhar para eles, acha que está vendo resultados experimentais, porque os números estão um pouco acima ou um pouco abaixo dos valores teóricos. O livro fala sobre ter que corrigir os erros experimentais – muito bem. O problema é que, quando você calcula o valor da constante de aceleração constante a partir desses valores, obtém a resposta correta. Mas uma bola rolando em um plano inclinado possui uma inércia que a faz girar, e, se você fizer o experimento, produzirá cinco sétimos da resposta certa, por causa da energia extra necessária para a rotação da bola. Portanto, esse único exemplo de “resultados” experimentais é obtido a partir de um experimento falso. Ninguém tinha rolando uma bola dessas, ou nunca teriam conseguido esses resultados! ... [Mais adiante, leu:] “A triboluminescência é a luz emitida quando os cristais são esmagados...” Eu disse: “E aí, você tem ciência? Não! Apenas se disse o que uma palavra significa em termos de outras palavras.”

A repercussão dessa palestra ultrapassou os limites da Academia. Osvaldo Frota Pessoa, biólogo destacado e afamado divulgador da ciência, escreveu a matéria “Não se aprende nada”. O físico Costa Ribeiro, ao fim da conferência, lembrou o conhecido conto de Andersen, em que as roupas (invisíveis) do Rei eram “admiradas pelos súditos”, até que um garoto de rua exclamou com franqueza: mas o rei está nu! O artigo termina com uma conclamação para a “revolução necessária” [17]:

Se queremos realmente fazer progredir a ciência no Brasil, urge revolucionar nossos métodos didáticos, em todos os níveis: primário, secundário e superior. Como assinalou muito bem Costa Ri-



Figura 5: Feynman (no centro da linha da frente) se divertindo no carnaval carioca de 1952 (Caltech Archives).

beiro, são as faculdades de filosofia, formadoras de novos mestres, que estão em posição estratégica para iniciar o movimento. E é de muito bom sinal que tenha sido na Faculdade Nacional de Filosofia, sob auspícios do Departamento de Física e do Diretório Acadêmico, que se tenha realizado a esclarecedora palestra do prof. Feynman. A falta de formalidades, pedantismo e academicismo que caracterizou a reunião foi uma das condições de sucesso. Os prolongados debates, em que participaram, com Feynman, alunos e professores da Faculdade, em seguida à conferência, se caracterizaram por ideias objetivas e sugestões felizes para melhoramento dos nossos métodos de ensino. Esperemos que este magnífico impulso inicial nos leve longe.

A revista *Ciência e Cultura*, em seu primeiro número de 1952 destaca, em editorial, que Feynman afirmou “o que todos sabemos, que a ciência é a descrição dos fenômenos da natureza, mas continuou afirmando o que nem todos nós sabemos, que ensinar ciência é pôr os alunos em contato com os fenômenos naturais e que o ensino usual, de memorizar fórmulas

**Apesar de avanços na pesquisa em ensino de física e na melhoria dos livros didáticos, pouco permaneceu daquilo que Feynman tentou nos ensinar e estamos ainda muito longe de alcançar o nível de ensinagem que Feynman propôs**

e definições, não é ensinar ciência; [...] só quando investiga, aguçado pela curiosidade e pelo encantamento ante o desconhecido, é que está aprendendo ciência.”

Apesar de consideráveis avanços na pesquisa em ensino de física, na melhoria dos livros didáticos proporcionados pelo PNLND, na formulação de diretrizes básicas para a formação de licenciados em ciências e para o ensino das Ciências da Natureza, pouco permaneceu daquilo que Feynman tentou nos ensinar e estamos ainda muito longe de alcançar o nível de ensinagem que Feynman propôs. Nosso ensino escolar é eminentemente comportamentalista, medido em termos de seus resultados, e a aprendizagem de física continua mecânica, baseada na memorização de conteúdos e resolução de problemas fechados que visam essencialmente a testagem. E pior, os conteúdos estão desatualizados, com pouca atenção à física contemporânea, e distantes dos avanços recentes da física quântica, da astrofísica e da nanociência, entre outras áreas.

Outro fato interessante das visitas de Feynman ao Brasil foi sua conferência na Academia Brasileira de Física (Julho de

1953) em que discorreu sobre o uso do Experimento da Dupla Fenda como instrumento para a discussão da interpretação de Copenhague da mecânica quântica, proposta por Niels Bohr com o princípio da complementaridade (a famigerada dualidade onda-partícula). Feynman popularizou essa discussão nos volumes I e III das *Lectures*.

Sua atuação no ensino no Brasil não se limitou ao nível superior. Ao lado de outras figuras importantes da física do Brasil, entre eles Abraão de Moraes, Paulus Pompeia, Costa Ribeiro, Jayme Tiomno e David Bohm, Feynman participou do I Curso de Aperfeiçoamento para Professores de Física [do nível secundário], realizado no ITA em julho de 1953. Ali apresentou a conferência *Minha experiência em relação ao ensino de física no Brasil*. Ressalte-se a participação expressiva de físicos na formação de professores. Esse curso teve sequência em 1955, mas não há registros de sua continuação. Felizmente, hoje a SBF, com apoio da Capes, promove o Mestrado Nacional Profissional de Ensino de Física, que atua em 58 instituições-polos, que se dedicam à capacitação e à atualização, em serviço, de professores de física de todas as regiões do país. O programa envolve docen-

tes dessas instituições que, em geral, passaram a se dedicar com maior entusiasmo ao ensino das disciplinas ministradas na licenciatura e estão mais abertos ao uso de metodologias inovadoras em sua prática.

Em 1963, Feynman abre a Conferência Interamericana de Ensino de Física, no Rio de Janeiro, com o discurso intitulado “*The Problem of Physics Teaching in Latin America*”. [18] Em estilo acadêmico formal, revisita sua experiência anterior no Brasil e estende considerações para a América Latina. Moreira resume pontos mais destacados na fala de Feynman [16]:

i) primeiramente, e o fator mais importante, é que o ensino/aprendizado é quase exclusivamente baseado em memorização. Aqui, Feynman relata várias experiências neste sentido que teve com estudantes da UIB e que depois reproduziria em seu livro; ii) os estudantes atuam sempre sozinhos e não interagem ou discutem com seus colegas; iii) a falta de liberdade no ambiente universitário; isto impede os estudantes de mudarem de área ou de laboratório;

iv) pouca atenção é dada ao conjunto maior de estudantes que não pretendem ser cientistas; v) outro ponto característico da América Latina é o pequeno número de pessoas envolvidas em atividades científicas, o que torna as organizações e instituições irregulares e instáveis; vi) os melhores alunos tendem a sair de seus países e se dirigem para o exterior.

## **Feynman e as Lectures**

David Goodstein conta que Feynman lhe confidenciou que “no longo prazo, sua mais importante contribuição para a física não seria a QED, a teoria do hélio superfluido, os pólarons ou os pártons. Seu verdadeiro monumento seriam suas *Feynman Lectures*”. Elas refletem sua visão peculiar de toda a física e como deveria ser ensinada, mais um desafio que concordou em assumir ao receber o convite para reformular o curso de física introdutória do Caltech.

Os três livros vermelhos despertam curiosidade, interesse e até mesmo fascinação em muitos estudiosos da física, em particular professores. Provavelmente, todos os leitores aficionados possuem suas passagens favoritas. Na introdução da Seção Especial da RBEF em que apresento os artigos dos colegas, destaco algumas das minhas preferidas. [19] As *Lectures* não podem ser consideradas uma coleção didática de estreia na aprendizagem da física. Constituem mais um guia para professores e alunos principiantes destacados. São volumes produzidos a partir das aulas gravadas e transcritas por Robert Leighton e Mathew Sands. Foram destinados a alunos calouros de física do Caltech, no período de setembro de 1961 a maio de 1963 (Fig. 6). Há fatos curiosos, lembrados por Mathews Sands, [20] acerca da construção do que Feynman se referiu como “essencialmente uma experiência” e à qual devotou grande empenho (não publicou nenhum artigo de pesquisa nesse período). E ao final, deu um tom pessimista a essa experiência [8]:

“A questão que se apresenta, naturalmente é saber até que ponto esta experiência foi bem-sucedida. Meu ponto de vista – que não parece ser compartilhado pela maioria das pessoas que trabalharam com os alunos – é pessimista. Não acho que tenha me saído muito bem com os estudantes. Quando paro para analisar o modo como a maioria deles lidou com os problemas nos exames, vejo que o sistema é um fracasso [...] Espero que minhas con-

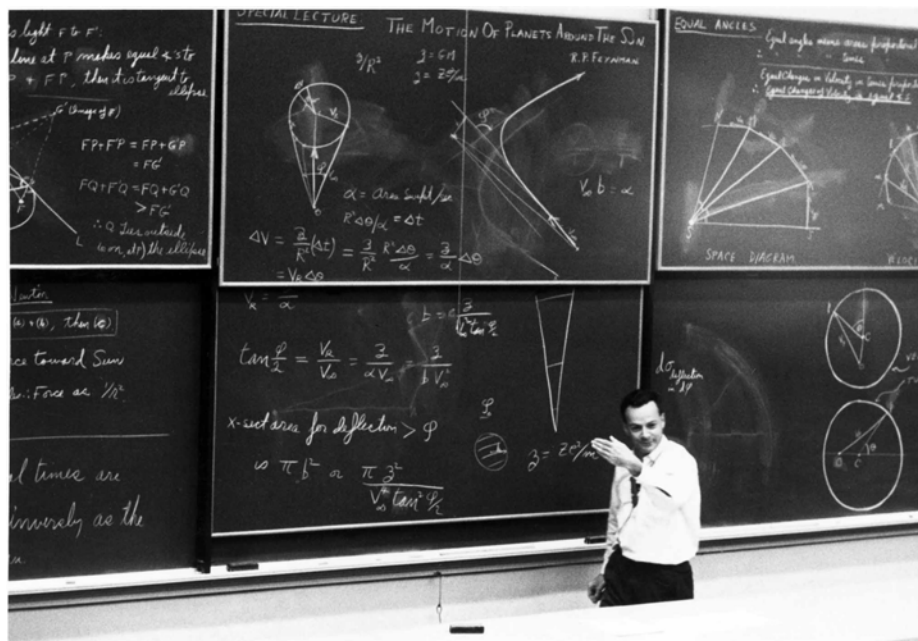


Figura 6: A aula “Movimento de planetas em torno do Sol”. Originalmente tirada para as Lectures, mas não foi publicada lá (Caltech Archives).

ferências possam contribuir de alguma forma. Talvez em algum lugarejo, onde haja professores e estudantes individuais, eles possam obter alguma inspiração ou ideias destas conferências. Talvez se divirtam refletindo sobre elas – ou desenvolvendo algumas ideias.”

**os alunos de pós-graduação americanos consideram as Lectures uma excelente fonte de revisão para os exames de qualificação**

Ricardo Karam seguiu esse conselho de Feynman ao mostrar algumas lições didáticas que podem ser extraídas das Lectures para o aperfeiçoamento da prática docente do professor de física no Brasil. Em seu artigo da Edição Comemorativa na RBEF, Karam [21] analisa as diferenças evidentes entre as Lectures e os livros didáticos tradicionais: muito texto; ausência de problemas; ênfase na fenomenologia; ordem e títulos dos capítulos incomuns; matemática a serviço da física e não como pré-requisito; diálogo pessoal. Ademais, aponta como a relação entre matemática e física, a epistemologia e a metacognição são trabalhadas na obra. A análise das Lectures foi brilhantemente exposta na palestra que proferiu na V Escola Brasileira de Ensino de Física, em agosto de 2018, na UFSC-Blumenau, tendo como alvo os docentes do MNPEF. Ao final, Karam proclamou dez manda-

mentos que Feynman nos ensinou a partir das Lectures [22]:

- 1) Melhor resolver 1 problema de 4 maneiras diferentes do que 4 problemas da mesma maneira;
- 2) Parta do simples ao complexo; do concreto ao abstrato;
- 3) Quando possível, faça a matemática emergir das situações físicas;
- 4) Evite ao máximo argumentos autoritários como “esse é um teorema matemático”; seja criativo, reinvente teoremas, faça suas próprias demonstrações;
- 5) Seja honesto com o estudante, reflita sobre as dificuldades para se entender o conteúdo e explicita-as quando for ensinar;
- 6) Procure evidenciar conexões e analogias profundas entre assuntos aparentemente distintos;
- 7) O conhecimento físico não é dividido em caixas, mostre relações entre as áreas da física;
- 8) Preencha de fenomenologia todo e qualquer assunto que for ensinar;
- 9) Não ensine somente física, mas também o que significa fazer física;
- 10) Seja metacognitivo em seu discurso; explicita onde você está, onde quer chegar, como pretende chegar lá, quais são as possíveis armadilhas, etc.

E o que se pode dizer sobre o impacto atual das Lectures no público escolar americano? Com a palavra, um de seus idealizadores, Mathews Sands, que escreveu em

suas memórias: [20]

Nas minhas viagens a serviço da Commission on College Physics, muitas vezes me encontrei com docentes de física em várias universidades. Ouvi dizer que a maioria dos instrutores não considera as Lectures adequadas para uso em suas aulas, embora alguns me informaram que usaram um ou outro dos volumes em uma turma especial ou como complemento para um texto comum. Muitas vezes tenho a impressão de que alguns instrutores estavam cautelosos de experimentar as Lectures porque eles temiam que os alunos poderiam fazer perguntas que não fossem capazes de responder. Mais comum é ouvir que os alunos de pós-graduação consideram as Lectures uma excelente fonte de revisão para os exames de qualificação.

De interesse para o leitor também é a série de conferências Messenger, dirigidas ao grande público e transcritas no livro *The Character of Physical Law* [10]. A primeira trata da conhecida lei da gravitação, como um exemplo de universalidade da física: “a natureza usa um fio muito longo para tecer suas tramas, mas um pequeno pedaço do tecido revela a organização de toda a tapeçaria”. Na conferência *A Relação entre a Matemática e a Física*, Feynman explicita as duas maneiras de uso da matemática na descrição da natureza, apelando para as diferenças entre a tradição babilônica e a tradição grega. Na Babilônia, “o aluno devia conhecer muita geometria, muitas propriedades dos círculos, o teorema de Pitágoras, fórmulas para as áreas de cubos e triângulos; além disso, aprendia argumentos para passar de uma coisa a outra e usava tabelas numéricas para resolver equações complicadas. Tudo era preparado para que se calculassem coisas.” Ao contrário, na Grécia, Euclides descobriu que havia uma maneira de deduzir todos os teoremas da geometria a partir de um conjunto simples de “axiomas”. Feynman se considerava um “matemático” babilônio. O capítulo *Os Grandes Princípios de Conservação* é leitura obrigatória para os professores que adotam uma visão fragmentada das várias leis de conservação como dispostas no livro didático. A seguir, Feynman aborda a *Simetria nas Leis Físicas*: translação e rotação no espaço, inversão temporal, princípio da relatividade (simetria para velocidades uniformes em linha reta) e o mais recente (década de 1950) princípio de simetria entre direita e esquerda nas interações. Explora, ainda, a conexão entre leis de con-



servação e leis de simetria. Os fenômenos irreversíveis são abordados com muitos exemplos, à la Feynman, na palestra *A Distinção em Passado e Futuro*. Na conferência acerca da *Visão Quântica da Natureza*, Feynman foca nos conceitos-chave de probabilidade e incerteza e alerta que elétrons e fótons, apesar de “esquisitos, diferentes de tudo que conhecemos”, se comportam de modo semelhante. E confessa: “Sobre esse aspecto, esta é a palestra mais difícil da série, pois é abstrata, distante da experiência”. A frase mereceria reparos, haja vista as atuais experiências sofisticadas que nos ajudaram a compreender os fenômenos quânticos (tunelamento, coerência, emaranhamento) e as inúmeras aplicações práticas da física quântica no nosso cotidiano: eletrônica moderna, baseada na estrutura de bandas de semicondutores; computadores e celulares; lasers; LEDs; nanotecnologia, imageamento NMR, PET scan, lasers e telecomunicações, GPS, internet quântica etc. Chama a atenção o fato de que Feynman tenta explicar a mecânica quântica para

um público amplo em meados dos anos 1960, enquanto o ensino de quântica, nos dias atuais, está ausente do ensino médio (com inserções irrelevantes sobre radiação do corpo negro, efeito fotoelétrico e modelo de Bohr que constituem a formação dos conceitos quânticos, e não o cerne da física quântica). Além disso, é abordado de forma insatisfatória nas disciplinas básicas de serviço no nível superior (áreas de ciências afins e engenharias). Nessa palestra, Feynman faz um comentário, em minha opinião, infeliz, sobre a dificuldade de se apreender a quântica e que, em geral, tem justificado a ausência do seu ensino nos níveis escolares mais elementares: “Posso afirmar com segurança que ninguém entende a mecânica quântica. Não levem, pois, esta palestra muito a sério, achando que precisam entender em termos de algum modelo o que vou descrever. Relaxem e aproveitem. Vou lhes contar como a natureza se comporta. Se vocês simplesmente admitirem que talvez ela se comporte assim, vão achá-la maravilho-

sa, encantadora. Não fiquem dizendo para si mesmos: ‘Como pode ser assim?’, pois nesse caso vão entrar num beco escuro de onde ninguém conseguiu sair. Ninguém sabe como pode ser assim”. Essa opinião de Feynman tem contribuído para reforçar a “estranheza” da quântica, que não é!, o misticismo quântico e a pseudociência, bem em moda nos tempos atuais. No que segue, Feynman usa o experimento da dupla fenda para discutir interferência quântica, probabilidade e indeterminação, como fizera no volume III das *Lectures*. A conferência final, *Em busca de Novas Leis*, está obviamente ultrapassada.

Agradeço ao Ildeu de Castro Moreira pelas conversas esclarecedoras e por compartilhar documentos e o entusiasmo pelo personagem Feynman, ao Ricardo Karam pela admiração conjunta pelas *Lectures* e aos colegas que contribuíram na Seção Especial da *RBEF* em homenagem a Feynman, em especial Silvio Salinas. Sou grato a Marcel Novaes e Débora Coimbra pela leitura crítica do artigo.

## Referências

- [1] C. Dornan, *The Smartest Guys in the Room*, The Globe and Mail, January 23, 1993. Disponível em <http://educatedguesses.ca/people/richard-feynman-john-von-neumann/>.
- [2] A.C. Aguilar, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **40**, e4205 (2018).
- [3] J.A. Wheeler, in *Special Issue: Richard Feynman*, *Physics Today* **42**(2), 24 (1989).
- [4] L.M. Brown and J.S. Rigden. *Most of the Good Stuff – Memories of Richard Feynman* (AIP, New York, 1993).
- [5] J.L. Lopes. Quipu: *Revista Latinoamericana de Historia de las Ciencias y la Tecnología* **7**, 383 (1990). Também em *Ciência e Sociedade*, CBPF-CS-013/88 (1988), disponível em <http://inspirehep.net/record/268082?ln=pt>.
- [6] R.P. Feynman, *Surely You're Joking, Mr. Feynman! – Adventures of a Curious Character* (W.W. Norton & Company, New York, 2018). Em português: *O Senhor Está Brincando, Sr. Feynman?* (Elsevier, São Paulo, 2006).
- [7] M. Gell-Mann, in *Special Issue: Richard Feynman*, *Physics Today* **42**(2), 50 (1989).
- [8] R.P. Feynman, R.B. Leighton and M. Sands, *The Feynman Lectures on Physics* (Benjamin Cummings, New Jersey, 2006). Em português: *Feynman: Lições de Física*. Tradução da Equipe do IFUSP sob supervisão de A. Fazzio. (Bookman, Porto Alegre, 2008).
- [9] Seção Especial – *Celebrando os 100 anos de nascimento de Richard P. Feynman*, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **40**, 4 (2018).
- [10] R.P. Feynman. *The Character of a Physical Law* (MIT Press, Cambridge, 1965). *Sobre as Leis da Física*, trad. Marcel Novaes e Nelson Studart (Contraponto/Editora PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2012).
- [11] D. Goodstein, in *Special Issue: Richard Feynman*, *Physics Today* **42**(2), 70 (1989).
- [12] N. Caticha, in *Revista Brasileira de Ensino de Física* **40**, e4202 (2018).
- [13] J. Gleick. *Genius: The Life and Science of Richard Feynman* (Open Road Media, New York, 2011).
- [14] M.A. Moreira, *Aprendizagem Significativa: A Teoria e Textos Complementares* (Editora Livraria da Física, São Paulo, 2011).
- [15] J. Bruner, *O Processo da Educação* (Edições 70, Lisboa, 2007).
- [16] I.C. Moreira, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **40**, e4203 (2018).
- [17] I.C. Moreira e M.C. Paiva, *A Física na Escola* **10**(1), 62 (2016).
- [18] R.P. Feynman, *Engineering and Science* (Caltech Magazine) **27**, 21 (1963). Texto em português na Ref. [16].
- [19] N. Studart, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **40**, e4201 (2018).
- [20] M. Sands, *Physics Today* **58**, 49 (2005).
- [21] R. Karam, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **40**, e4204 (2018).
- [22] R. Karam, *Lições didáticas extraídas das Feynman Lectures*. Palestra 4 do minicurso Metodologias Alternativas no Ensino de Física, disponível em <http://ebef.ufsc.br/material/>.

## Leitura adicional

- L. Mlodinow, *O Arco Íris de Feynman* (Sextante, São Paulo, 2005).  
J.M.F. Bassalo e F. Caruso, *Feynman* (Ed. Livraria da Física, São Paulo, 2013).  
R. Rosenfeld, *Feynman e Gell-Mann* (Odysseus, São Paulo, 2003).  
J. Mehra, *The Beat of a Different Drum: The Life and Science of Richard Feynman* (Oxford University Press, Oxford, 1994).

# Teleporte de uma partícula: Um protocolo no contexto do ensino médio

.....  
**Matheus Pereira Lobo\***,  
**Sue Lam Rhâmidda Pereira Gomes,**  
**Ednalva Alves de Alencar,**  
**Caio Matheus Fontinele dos Santos**  
Universidade Federal do Tocantins,  
Araguaína, TO, Brasil  
\*E-mail: mplobo@uft.edu.br  
.....

## Introdução

O emaranhamento representa uma ligação especial não completamente compreendida pela comunidade científica [1], mas confirmada por inúmeros experimentos [2]. Ele ocorre, por exemplo, quando os estados de duas (ou mais) partículas são inseparáveis. Em certo sentido, o emaranhamento pode ser considerado um caso particular de superposição de estados quânticos separados espacialmente [3]. Em linguagem simples, superposição de estados significa uma partícula poder ocupar mais de um estado ao mesmo tempo, como por exemplo, poder estar em duas ou mais regiões distintas. Dizemos que uma partícula colapsa quando se faz uma medição em algum de seus observáveis (posição, momento, polarização, spin etc). Isso significa que de todos os possíveis estados, apenas um deles é observado diretamente após a medição. No caso de duas partículas emaranhadas, a medição em uma partícula altera a propriedade da outra partícula. Há estudos, no entanto, para averiguar se essa alteração é realmente instantânea ou se ocorre a uma velocidade muito grande, acima da velocidade da luz [4]. Vale ressaltar, no entanto, que a não-localidade não é uma característica exclusiva do emaranhamento, tampouco representa sua definição. Em outras palavras, há estados não emaranhados com correlações não-locais.

O teleporte é uma realização física, fruto do emaranhamento quântico e tem sido estudado em diferentes protocolos e confirmado por diversos experimentos [2]. A primeira realização experimental do teleporte ocorreu em 1997 com um único

fóton [5]. Recentemente, um estado quântico foi teleportado até um satélite a cerca de 1.400 km [6]. Além do teleporte, as aplicações do emaranhamento incluem criptografia, comunicação e computação quântica [7], entre outras.

Antes de iniciarmos, é bom destacar que nesse contexto é comum denominar os sistemas A e B por Alice e Bob, respectivamente (Fig. 1). Cada um desses sistemas é composto por um conjunto de partículas e está separado espacialmente por uma distância arbitrária. A ideia aqui é teleportar a informação de uma partícula quântica de A até B e não propriamente a partícula em si. Veremos o protocolo mais simples para o teleporte da informação de uma partícula em um estado desconhecido do sistema A para o sistema B [8]. Para isso, serão necessárias três partículas, a partícula original X (a ser teleportada), a partícula final Z (que se transformará em uma cópia de X) e a partícula Y (intermediadora). Veja a Fig. 2.

**O emaranhamento representa uma ligação especial não completamente compreendida pela comunidade científica, mas confirmada por inúmeros experimentos. Ele ocorre, por exemplo, quando os estados de duas (ou mais) partículas são inseparáveis**

## As equações para o protocolo de teleporte

Trabalharemos aqui com equações de duas variáveis para a realização do teleporte de uma partícula. Considere as seguintes funções das variáveis  $x_i$ ,  $y_i$  e  $z_i$ , com  $i = 1, 2$ ,

$$g_{xy}^{\pm} = \frac{1}{\sqrt{2}}(x_1 y_2 \pm x_2 y_1), \quad (1)$$

$$h_{xy}^{\pm} = \frac{1}{\sqrt{2}}(x_1 y_1 \pm x_2 y_2), \quad (2)$$

$$g_{yz}^{\pm} = \frac{1}{\sqrt{2}}(y_1 z_2 \pm y_2 z_1), \quad (3)$$

Neste trabalho propomos a realização teórica do teleporte quântico de uma partícula por meio de cálculos envolvendo equações com duas variáveis ( $x$  e  $y$ ). Demonstramos a importância do emaranhamento – que é fundamental para o teleporte – a partir de um protocolo envolvendo três partículas. O objetivo é proporcionar aos professores e estudantes do Ensino Médio uma forma didática de compreender o tema, integrando a visão qualitativa com os procedimentos matemáticos. Os pré-requisitos incluem números complexos, propriedade distributiva, igualdade de polinômios e produto de matrizes. Com isso, acreditamos poder inserir temas avançados de física contemporânea a partir de ferramentas matemáticas presentes no cotidiano escolar dos estudantes do Ensino Médio.



Figura 1: Alice (na Terra) teleportará uma partícula para Bob (em Marte).

$$h_{yz}^{\pm} = \frac{1}{\sqrt{2}}(y_1 z_1 \pm y_2 z_2). \quad (4)$$

Trata-se de um sistema com 8 equações e 6 variáveis.  $g_{yz}$  e  $h_{yz}$  foram obtidas substituindo-se  $xy$  por  $yz$  nas definições de  $g_{xy}$  e  $h_{xy}$ . Note que o índice  $\pm$  refere-se à soma ou à subtração de seus termos. As funções  $g_{xy}$  e  $g_{yz}$  representam um sistema com as partículas XY e YZ emaranhadas, respectivamente. O mesmo vale para  $h_{xy}$  e  $h_{yz}$ . As Eqs. (1)-(4) representam a base de Bell [8], frequentemente chamada de estados EPR ou estados emaranhados.

Os estados quânticos – aqui representados por  $g_{xy}^{\pm}$ ,  $h_{xy}^{\pm}$ ,  $g_{yz}^{\pm}$  e  $h_{yz}^{\pm}$  – são vetores em um espaço complexo denominado espaço de Hilbert. Vetores são entidades matemáticas que obedecem certas propriedades e são utilizadas para descrever sistemas físicos (o leitor curioso em conhecer tais propriedades poderá consultar um livro de álgebra linear). O espaço de Hilbert pode

ter um número finito ou infinito de dimensões e contém vetores representados por números complexos. Neste artigo, estamos interessados apenas em manipular esses estados por meio da álgebra elementar, envolvendo números complexos, propriedade distributiva da multiplicação de expressões algébricas, igualdade de polinômios e produtos de matrizes. Por isso trataremos, a partir de agora, esses estados quânticos (vetores no espaço de Hilbert) simplesmente como variáveis  $x$  e  $y$ .

Assim, temos que  $x_i$ ,  $y_i$  e  $z_i$  representam, respectivamente, os estados das partículas X, Y e Z. Cada partícula pode estar em uma superposição de estados 1 e 2. Esses estados podem representar a polarização de um fóton ou o spin do elétron, por exemplo, pois tanto a polarização do fóton como o spin do elétron são dados por apenas dois estados. As Eqs. (1)-(4) são superposições de estados quânticos emaranhados, o índice  $xy$  de  $g$  e  $h$  significa que as partículas X e Y estão emaranhadas e  $yz$  significa o emaranhamento entre as partículas Y e Z. Note que é impossível escrevermos  $g_{xy'}$ ,  $g_{yz'}$ ,  $h_{xy'}$  e  $h_{yz'}$  como um produto de uma função de  $x_i$  com uma função de  $y_i$ . Por exemplo,  $g_{xy}(x_1, x_2, y_1, y_2) \neq g_x(x_1, x_2) \cdot g_y(y_1, y_2)$ , isto é, o estado da partícula X,  $g_x(x_1, x_2)$ , não pode ser separado do estado da partícula Y,  $g_y(y_1, y_2)$ . Em outras palavras, a inseparabilidade do sistema caracteriza o emaranhamento. É por isso que partículas emaranhadas podem ser vistas como se fossem estados distintos de um único sistema. Em informação quântica, existem diferentes medidas de emaranhamento para caracterizá-lo mediante todas as possíveis bases. Por exemplo, fazendo uma analogia clássica, é como uma moeda girando (um único sistema) composta por dois estados dis-

tintos coexistindo (cara e coroa). Enquanto a moeda está girando, ela está em superposição de estados (cara e coroa); quando ela para de girar e cai sobre a mesa, por exemplo, ocorre o colapso, apenas uma de suas faces aparece virada para cima (Fig. 3).

### Teleporte da partícula X

Inicialmente temos um sistema composto por três partículas, X, Y e Z. A partícula X encontra-se na superposição de estados

$$f_x = ax_1 + bx_2, \quad (5)$$

sendo  $a$  e  $b$  números complexos que satisfazem a seguinte condição de normalização

$$|a|^2 + |b|^2 = 1. \quad (6)$$

Na teoria quântica,  $|a|^2$  e  $|b|^2$  representam as probabilidades de encontrarmos a partícula X nos estados  $x_1$  e  $x_2$ , respectivamente. Por isso a Eq. (6) é igual a 1, porque a partícula encontra-se em um dos dois estados possíveis.

Suponha que as partículas Y e Z estejam emaranhadas na forma de  $g_{yz}^-$  [Eq. (3)]. Assim, temos que o sistema de três partículas é dado por  $f_x g_{yz}^-$ . Substituindo as Eqs. (3) e (5) em  $f_x g_{yz}^-$  temos

$$f_x g_{yz}^- = \frac{1}{\sqrt{2}}(-ax_1 y_2 z_1 + bx_2 y_1 z_2 + ax_1 y_1 z_2 - bx_2 y_2 z_1). \quad (7)$$

Nosso objetivo aqui é teleportar a partícula X de Alice para Bob. Como nos filmes de ficção científica, será necessário “destruir” X para transferir sua informação para a partícula Z ou, para sermos mais precisos, X e Y deverão colapsar em um estado particular para que Z também

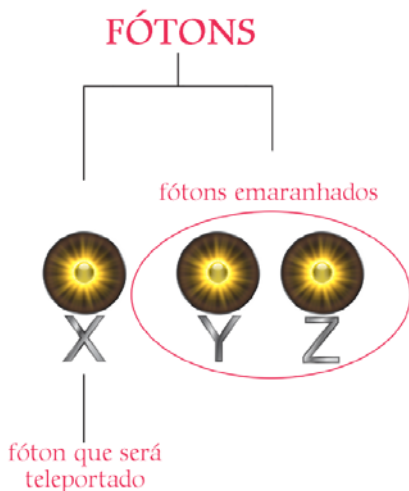


Figura 2: Ilustração das três partículas utilizadas para o teleporte.

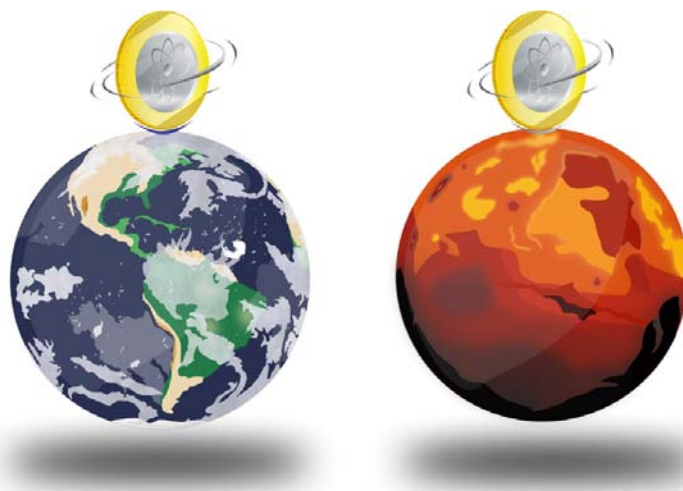


Figura 3: Diagrama ilustrando um análogo clássico com duas moedas emaranhadas girando, uma na Terra e outra em Marte.



colapse. Com isso, será possível aplicar uma transformação tal que Z seja idêntica a X. As partículas X e Y permanecem com Alice e a partícula Z é enviada para Bob.

O teleporte será realizado por meio de dois passos: (i) primeiro, pela transferência do emaranhamento, de YZ para XY; (ii) depois, por meio de um canal de comunicação clássico, limitado pela velocidade da luz (WhatsApp, por exemplo).

Para transferirmos o emaranhamento de YZ para XY, precisamos fazer a seguinte transformação matemática

$$f_x g_{yz}^- = g_{xy}^- \alpha + g_{xy}^+ \beta + h_{xy}^- \gamma + h_{xy}^+ \delta. \quad (8)$$

O lado esquerdo da Eq. (8) diz que o sistema é composto pela superposição de estados da partícula X, dado por  $f_x$ , e pelo emaranhamento de Y e Z, dado por  $g_{yz}^-$ . O lado direito da Eq. (8) significa que a partícula Z (aqui representada pelos produtos envolvendo  $\alpha, \beta, \gamma$  e  $\delta$ ) está em uma superposição de quatro estados de emaranhamento XY, representados por  $g_{xy}^-, g_{xy}^+, h_{xy}^-$  e  $h_{xy}^+$ .

O próximo passo é descobrir quem são  $\alpha, \beta, \gamma$  e  $\delta$ . Substituindo as Eqs. (1) e (2) na Eq. (8),

$$f_x g_{yz}^- = \frac{\alpha}{\sqrt{2}} (x_1 y_2 - x_2 y_1) + \frac{\beta}{\sqrt{2}} (x_1 y_2 + x_2 y_1) + \frac{\gamma}{\sqrt{2}} (x_1 y_1 - x_2 y_2) + \frac{\delta}{\sqrt{2}} (x_1 y_1 + x_2 y_2),$$

temos

$$f_x g_{yz}^- = \frac{1}{\sqrt{2}} [x_1 y_2 (\alpha + \beta) + x_2 y_1 (-\alpha + \beta) + x_1 y_1 (\gamma + \delta) + x_2 y_2 (-\gamma + \delta)]. \quad (9)$$

Igualando a Eq. (7) com a Eq. (9), encontramos

$$\begin{aligned} -a x_1 y_2 z_1 + b x_2 y_1 z_2 + a x_1 y_1 z_2 - b x_2 y_2 z_1 &= \\ = x_1 y_2 (\alpha + \beta) + x_2 y_1 (-\alpha + \beta) + & \\ + x_1 y_1 (\gamma + \delta) + x_2 y_2 (-\gamma + \delta). & \end{aligned}$$

Essa equação é uma identidade polinomial. Igualando o coeficiente de  $x_1 y_2$  dos lados esquerdo e direito, temos

$$-a z_1 = \alpha + \beta. \quad (10)$$

Fazendo o mesmo para  $x_2 y_1, x_1 y_1$  e  $x_2 y_2$  temos, respectivamente,

$$b z_2 = -\alpha + \beta, \quad (11)$$

$$a z_2 = \gamma + \delta, \quad (12)$$

$$-b z_1 = -\gamma + \delta. \quad (13)$$

Subtraindo as Eqs. (10) e (11),

$$\alpha = -\frac{1}{2} (a z_1 + b z_2). \quad (14)$$

Somando as Eqs. (10) e (11),

$$\beta = \frac{1}{2} (-a z_1 + b z_2). \quad (15)$$

Subtraindo as Eqs. (12) e (13),

$$\gamma = \frac{1}{2} (a z_2 + b z_1). \quad (16)$$

Somando as Eqs. (12) e (13),

$$\delta = \frac{1}{2} (a z_2 - b z_1). \quad (17)$$

Substituindo  $\alpha, \beta, \gamma$  e  $\delta$  na Eq. (8),

$$f_x g_{yz}^- = \frac{1}{2} [g_{xy}^- (-a z_1 - b z_2) + g_{xy}^+ (-a z_1 + b z_2) + h_{xy}^- (a z_2 + b z_1) + h_{xy}^+ (a z_2 - b z_1)]. \quad (18)$$

O parêntesis do lado direito da Eq. (18) refere-se à partícula Z. A informação da partícula original X, a ser teleportada, que está no estado geral  $f_x$ , é dada pela Eq. (5). Alice faz agora uma medição conjunta das partículas emaranhadas X e Y, podendo obter um dos seguintes resultados:  $g_{xy}^-, g_{xy}^+, h_{xy}^-$  ou  $h_{xy}^+$ . Em outras palavras, quando o sistema XY colapsa, Z também colapsa.

Na Eq. (18), temos quatro estados de superposição para o sistema XYZ, dados pelos termos que contém  $g_{xy}^-, g_{xy}^+, h_{xy}^-$  e  $h_{xy}^+$ . Esses, por sua vez, também são estados de superposição [veja Eqs. (1)-(2)]. Assim, temos uma superposição de segunda ordem, isto é, uma superposição da superposição em apenas uma das quatro superposições mencionadas (base de Bell). Note que se Alice medisse apenas a partícula X, ela colapsaria e, portanto, não poderia mais ser teleportada como um sistema quântico. Medição conjunta é um termo que vem do inglês (*joint measurement*) [9] e significa medir mais de uma variável aleatória simultaneamente (Fig. 4).

A Tabela 1 mostra todos os possíveis resultados para a medição em conjunto



Figura 4: Na medição conjunta, o sistema XY colapsa em uma das quatro bases de Bell. Os estados das partículas individuais não são conhecidos.

de XY e o estado da partícula colapsada Z, conforme a Eq. (18).

O estado da partícula X pode ser mais bem representado por uma matriz, da seguinte maneira

$$f_x = a x_1 + b x_2 \rightarrow \begin{pmatrix} a \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}, \quad (19)$$

isto é, a primeira linha da matriz coluna representa o estado 1 (por meio da variável  $x_1$ ) e a segunda linha representa o estado 2 (por meio de  $x_2$ ).

Para que o teleporte seja bem-sucedido, devemos ter  $f_z = f_x$  porque o estado de Z deve ser idêntico ao de X. Para cada um dos valores colapsados de Z, temos uma matriz correspondente que transforma Z em X. Essas matrizes são

$$\begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad (20)$$

pois quando aplicadas em cada um dos valores medidos para XY (Tabela 1), transformam Z em X,

$$\begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -a \\ -b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}, \quad (21)$$

$$\begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -a \\ b \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}, \quad (22)$$

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b \\ a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}, \quad (23)$$

$$\begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -b \\ a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}. \quad (24)$$

As matrizes (20) são facilmente obtidas por dedução lógica, a partir das formas matriciais de Z colapsado (Tabela 1) e de  $f_x$ .

Portanto, para finalizar o teleporte da partícula X, Alice deverá enviar para Bob o resultado de sua medição em conjunto (XY), dado por uma dessas quatro matrizes (20), por meio do canal clássico de comunicação. É importante salientarmos que o teleporte não é instantâneo, pois depende da comunicação clássica do resultado de uma medição para que ele seja

Tabela 1: O lado esquerdo representa o colapso das partículas X e Y e o lado direito representa o colapso de Z.

XY (medido)	Z (colapsado)
$g_{xy}^-$	$f_z = -a z_1 - b z_2$
$g_{xy}^+$	$f_z = -a z_1 + b z_2$
$h_{xy}^-$	$f_z = a z_2 + b z_1$
$h_{xy}^+$	$f_z = a z_2 - b z_1$

bem-sucedido. Caso o teleporte fosse instantâneo, isso violaria a relatividade especial, ao menos na forma como a conhecemos atualmente [10].

### Considerações finais

A informação quântica lida com a informação contida em estados quânticos, bem como suas possíveis utilizações. O emaranhamento é o elemento chave para o teleporte quântico, algoritmos para computação, criptografia e comunicação quântica, entre outras aplicações. No Brasil, há laboratórios produzindo estados emaranhados, especialmente para o desenvolvimento da computação e criptografia quântica, e grupos teóricos investigando as propriedades do emaranhamento e de seus efeitos associados [11]. O leitor interessado encontrará mais informações a respeito desses grupos brasileiros pesquisando no Google e no Diretório dos Grupos de Pesquisa do CNPq.

Por meio deste trabalho, esperamos divulgar a área de informação quântica, que é de extrema importância para o avanço da ciência, tecnologia, sociedade e ambiente. Reiteramos nosso compromisso de utilizar a matemática disponível no Ensino Médio aplicada a um tema avançado, reafirmando nosso objetivo de proporcionar aos professores e estudantes uma forma didática de compreender o tema em questão. Outra vantagem de utilizar essa notação matemática, em vez

da famigerada notação de Dirac, é poder estimular mudanças de paradigma que tal posicionamento possa permitir em realizações posteriores.

Embora alguns tópicos de física moderna estejam presentes nos conteúdos programáticos do Ensino Médio, muitos estudantes não têm contato com eles. O presente artigo pode servir como mediador dos conhecimentos científicos ao desmistificar os conceitos de teleporte e emaranhamento quântico, mostrando que não se trata de mera ficção científica, mas faz parte de um amplo espectro de possi-

bilidades tecnológicas na atual era da informação quântica.

### Agradecimentos

Agradecemos à Universidade Federal do Tocantins por oferecer toda a infraestrutura necessária para a realização deste trabalho, ao Mestrado Profissional em Ensino de Física (MNPEF) da Sociedade Brasileira de Física (SBF) e ao CNPq pelo apoio financeiro. Em especial, destacamos nossos fortes agradecimentos aos professores idealizadores do MNPEF da SBF, Nelson Studart e Marco Antonio Moreira.

### References

- [1] A.D. Aczel, *Entanglement: The Greatest Mystery in Physics: The Phenomenon that Reimagines Space and Time— And What it Means for Black Holes, the Big Bang, and Theories of Everything* (Macmillan, London, 2015).
- [2] R. Horodecki, P. Horodecki, M. Horodecki and K. Horodecki, *Reviews of Modern Physics* **81**, 865 (2009).
- [3] G. Musser, *Spooky Action at a Distance* (Scientific American / Farrar, Straus and Giroux, New York, 2016).
- [4] J. Yin, Y. Cao, H.-L. Yong, J.-G. Ren, H. Liang, *et al.*, *Physical Review Letters* **110**, 260407 (2013).
- [5] D. Bouwmeester, J.-W. Pan, K. Mattle, M. Eibl, H. Weinfurter and A. Zeilinger, *Nature* **390**, 575 (1997).
- [6] J.-G. Ren, P. Xu, H.-L. Yong, L. Zhang, S.-K. Liao, J. Yin, *et al.*, arXiv preprint quant-ph/1707.00934 (2017).
- [7] A.C. Santos, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **39**, e1301 (2017).
- [8] A. Miranowicz and K. Tamaki. arXiv preprint quant-ph/0302114 (2003).
- [9] N. Gisin, *Quantum Chance: Nonlocality, Teleportation and Other Quantum Marvels* (Springer, New York, 2014).
- [10] E.F. Taylor and J.A. Wheeler, *Spacetime Physics* (W.H. Freeman and Company, New York, 1992), 2<sup>nd</sup> ed.
- [11] L. Davidovich, *Ciência Hoje* **35**, 24 (2004).



# Pilates: Um olhar da física

.....  
**Márcia Maria Lucchese**  
 Universidade Federal do Pampa,  
 Campus Bagé, Bagé, RS, Brasil

**Guilherme Frederico Marranghello**  
 Universidade Federal do Pampa,  
 Campus Bagé, Bagé, RS, Brasil  
 E-mail: gfmarranghello@gmail.com

**Fábio Saraiva da Rocha**  
 Centro de Integração do Mercosul,  
 Universidade Federal de Pelotas,  
 Eldorado do Sul, RS, Brasil

.....

## Introdução

**D**iversas atividades humanas são muito repetitivas. Por exemplo, passamos horas no computador, ou em pé, praticando atividades de esforços repetitivos. Com o passar do tempo e com a idade sentem-se dores e desconforto. Com o objetivo de ajudar a minimizar esse quadro e adquirir uma melhor postura e qualidade de vida, as pessoas recorrem às atividades propostas por Joseph Pilates no início da década de 1920.

O Pilates tem como base um conceito denominado de contrologia, que é o controle consciente de todos os movimentos musculares do corpo.

É a correta utilização e aplicação dos mais importantes princípios das forças que atuam em cada um dos ossos do esqueleto humano, com o conhecimento dos mecanismos funcionais do corpo e o entendimento dos princípios de equilíbrio e gravidade aplicados a cada movimento (no estado ativo, em repouso e dormindo). O método indicado por Pilates fortalece a musculatura abdominal, dorsal e a coluna vertebral, além de apontar exercícios para o corpo todo [1].

A execução das atividades pode ser feita tanto com poucos acessórios quanto com aparelhos constituídos de molas e roldanas que promovem um aumento na carga do exercício, possibilitando movimentos para vários grupamentos musculares. Com o objetivo de analisar os movimentos desenvolvidos em dois tipos de aparelhos, o Reformer e a cadeira Combo, elaborados para a execução das atividades do Pilates, este trabalho propõe-

se a identificar e estudar a física presente na mecânica dos aparelhos. Serão analisados em especial a lei de Hooke, sistemas de molas, alavancas, roldanas e torque. O objetivo dessa análise está em demonstrar como distintas construções de sistemas que envolvem massas e roldanas podem gerar exercícios mais ricos e desafiadores para as aulas de física.

## Contextualização histórica e aparelhos

O método Pilates® foi criado por Joseph Hubertus Pilates. Nascido na Alemanha em 1880, tinha saúde frágil na infância e para remediar sua condição

dedicou-se a praticar inúmeras atividades físicas, como ginástica, mergulho, esqui e boxe. Era um autodidata conhecedor de fisiologia, anatomia e da medicina tradicional chine-

nesa, além de estudar ioga, artes marciais e o movimento dos animais. Durante a Primeira Guerra Mundial, Pilates, então com 32 anos, vivia na Inglaterra, estudava boxe, trabalhava como instrutor da equipe da Scotland Yard e ainda era artista de circo. Foi então considerado inimigo estrangeiro e preso em um campo de concentração com seus colegas do circo. Confinado no campo de concentração, ele atuou como enfermeiro, auxiliou na recuperação dos feridos e desenvolveu o método Pilates com o que

tinha disponível na enfermaria. Os equipamentos usados hoje são semelhantes aos criados por ele nessa época. O método Pilates foi reconhecido quando vítimas da epi-

demia do vírus Influenza morreram e apenas os internos treinados por Pilates não foram infectados. Pilates morreu em 1967,

**O método Pilates foi reconhecido quando vítimas da epidemia do vírus Influenza morreram e apenas os internos treinados por Pilates não foram infectados**

**O Pilates tem como base um conceito denominado de contrologia, que é o controle consciente de todos os movimentos musculares do corpo**

Este trabalho apresenta uma discussão sobre aspectos físicos de mecânica clássica envolvidos em equipamentos usados no método Pilates. Esses equipamentos têm seus princípios de funcionamento baseados na resistência de molas e alavancas que permitem ao executor do exercício diversos movimentos com graus variados de empenho de força. No Pilates é possível encontrar cinco cores para cinco molas com intensidades diferentes nos aparelhos: prata, vermelha, verde, azul e amarela, sendo a de cor prata a mais resistente e a amarela a de menor resistência. Em especial discutimos o comportamento da grandeza força em função da configuração mecânica do equipamento.



com 87 anos.

Com a popularização das atividades e dos equipamentos desenvolvidos por Pilates, várias empresas passaram a promover cursos e desenvolver equipamentos necessários para a realização dos exercícios. Neste trabalho usamos como exemplo os equipamentos desenvolvidos pela empresa *PhysioPilates*. Nas Figs. 1 e 2 estão os equipamentos Reformer e cadeira Combo, vendidos pela empresa, e que foram objetos de estudo neste trabalho.

O aparelho da Fig. 1(a), denominado Reformer, consiste em um carrinho disposto sobre um trilho e preso a um sistema de molas. O usuário pratica extensão nas molas, sofrendo a ação da força das diferentes associações de molas que possuem diferentes constantes elásticas. Veja a Fig. 1(b). Esse aparelho também possui em um sistema de roldanas ajustáveis.

A Fig. 2 mostra o equipamento cadeira Combo. Segundo informação do fabricante, nessa cadeira também é possível alterar o sistema de molas, promovendo diversas gradações de esforço.

## A mecânica do sistema

### O sistema de molas

Hooke deixou um legado na física explicando o funcionamento das molas. Sua lei é bastante conhecida e é trabalhada desde o Ensino Médio [2].

$$F = k(x - x_0) \quad (1)$$

Nessa equação  $x_0$  representa a posição de equilíbrio da mola,  $x$  a posição final,  $k$  a constante elástica e  $F$  a força resultante.

A descrição das molas comercializadas pela empresa *PhysioPilates* apresenta molas feitas de aço carbono niquelado. Essas molas são fixadas com ganchos coloridos que identificam sua constante elástica.



(a)



(b)

Figura 2: Cadeira Combo em (a) e em (b) a ampliação do detalhe do sistema de molas.

Quanto maior a constante elástica, maior será a força necessária para deslocar a mola do equilíbrio. A Fig. 3 apresenta um gráfico da força de resistência da mola em relação à sua elongação. A partir desse gráfico podemos inferir que os valores para as constantes das molas são: 220 N/m para a mola vermelha, 128 N/m para a mola azul e 88 N/m para a mola amarela.

Com o deslocamento do carrinho, ocorre a mesma elongação para as diferentes molas presas ao sistema, assim podemos calcular uma constante elástica equivalente, que corresponderia ao caso onde apenas uma mola estivesse presa, representando todo o sistema:

$$F = k_1x + k_2x \quad (2)$$

Para o caso de duas molas com  $k$ s diferentes, o resultado fica:

$$F = (k_1 + k_2)x \quad (3)$$

E assim, um  $k$  equivalente seria:

$$k = k_1 + k_2 \quad (4)$$

Com duas molas com mesma cor, isto é, com mesma constante elástica teríamos:

$$k = k_1 + k_2 = k_1 + k_1 = 2k_1 \quad (5)$$

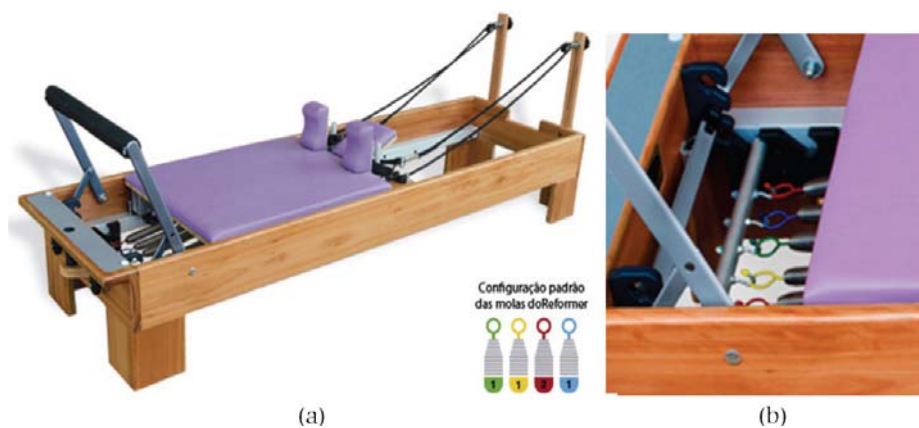
Nesse caso, o sistema exige o dobro de força para promover a mesma elongação que o sistema no qual apenas uma mola está presa.

### Sistema de roldanas e molas

Conforme sugere a Fig. 4, o Reformer apresenta um sistema de roldanas que pode ser utilizado para movimentar um carrinho. Durante a execução do exercício pode-se fazer diferentes movimentos que acarretarão em diferentes orientações para as cordas; entretanto, o trecho de corda que vai da roldana ao carrinho apresenta sempre o mesmo movimento e é nesse movimento que deteremos nossa atenção.

Pode-se descrever, de forma simplificada, que a corda consiste na hipotenusa de um triângulo retângulo cujos catetos são: o trecho de movimentação do carrinho (que chamaremos de cateto adjacente ao ângulo formado com a corda) e a altura da roldana (que chamaremos de cateto oposto). Veja a Fig. 5.

O exercício físico torna-se exigente na medida em que o carrinho estica as molas, pois maior deve ser a força para movimentá-lo. Ainda, conforme o carrinho avança, o cateto adjacente diminui. Como o carrinho tem seu movimento restrito ao trilho, apenas a componente horizontal da tensão da corda serve para movimentá-lo e, com a diminuição desse cateto, a tensão vai ficando cada vez mais próxima da vertical. Reunindo essas informações, a força feita por quem executa esse movimento pode ser descrita pelas equações a seguir.



(a)

(b)

Figura 1: (a) Aparelho Reformer constituído de molas resistivas e roldanas e (b) os detalhes da associação de molas.

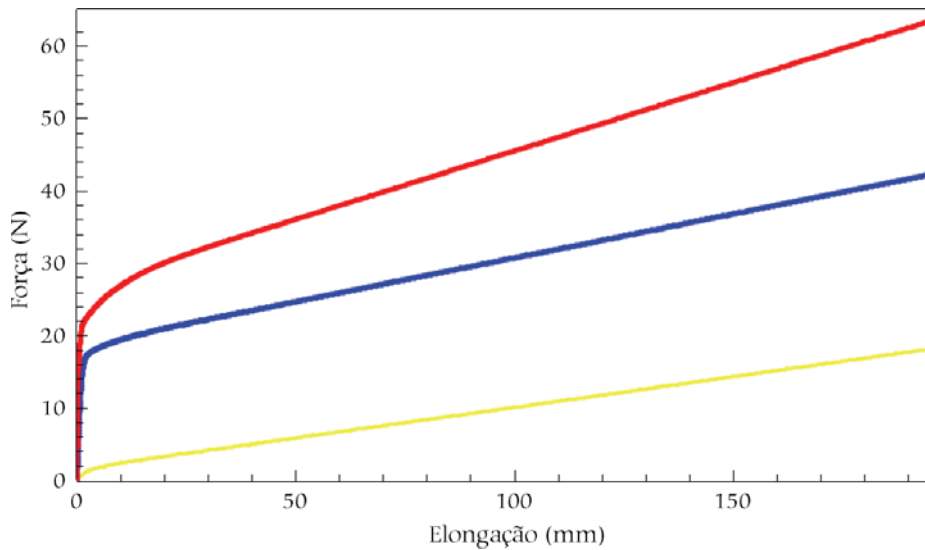


Figura 3: gráfico da força de resistência da mola, força elástica (N) em relação à sua elongação (mm).

$$\cos\theta = \frac{L-x}{h} \quad (8)$$

Temos que a força exercida pelo executor do movimento é igual à tensão na corda, assim:

$$F = T \text{ e } T_x = F_m \quad (9)$$

Partindo de uma posição  $x_0 = 0$  a força será:

$$T \cos\theta = kx \quad (10)$$

isolando a força,

$$F = \frac{kx}{\cos\theta} \quad (11)$$

E assim, substituindo as Eqs. (6) e (8) na Eq. (11), a força que o executor do movimento deverá fazer na mola será igual a:

$$F = \frac{kx\sqrt{y^2 + (L-x)^2}}{L-x} \quad (12)$$

A Fig. 6 mostra o comportamento gráfico da expressão da força que deverá ser feita para deslocar o carrinho no aparelho Reformer.

Apesar da força que uma mola exerce ser linearmente proporcional à sua elongação, o sistema montado para o exercício de Pilates proporciona algumas variações. No caso acima, a corda é puxada, em regime de variação aproximadamente linear com relação ao deslocamento; entretanto, conforme a parte móvel da cama se aproxima de seu limite, a corda vai sendo desviada da direção do deslocamento, exigindo maior força do executor do movimento. Nesse trecho final a força que o praticante do exercício deve exercer para continuar o movimento cresce num regime não linear.

### Sistema de alavancas e molas

Outros exercícios podem ser realizados com o auxílio de alavancas associadas a molas. Um destes, utilizando a cadeira Combo, pode ser visto na Fig. 7(a) e o diagrama esquemático das molas se observa em detalhes na Fig. 7(b).

Podemos analisar o sistema de molas da Fig. 7(b) e ter resultados diferentes para o comportamento da força, se comparados com os resultados do sistema Reformer. As diferenças, nesse caso, dizem respeito à alavanca e à posição onde as molas são fixadas.

Analisemos inicialmente a questão da alavanca. Como ela irá girar ao redor de um eixo, não devemos mais nos restringir a falar apenas sobre a força; devemos agora falar também do torque. Nos exercícios em que se está com o pé sobre a barra, o peso do corpo somado à força exercida diretamente na alavanca gera o torque.



Figura 4: Execução do movimento no aparelho Reformer.

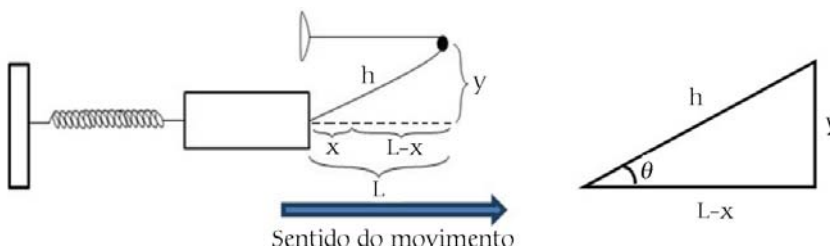


Figura 5: Detalhe do diagrama esquemático da execução do aparelho Reformer.

O deslocamento do carrinho pode ser descrito pelo Teorema de Pitágoras:

$$h = \sqrt{y^2 + (L-x)^2} \quad (6)$$

Nas Eqs. (7) e (8) estão as relações trigonométricas:

$$\sin\theta = \frac{y}{h} \quad (7)$$

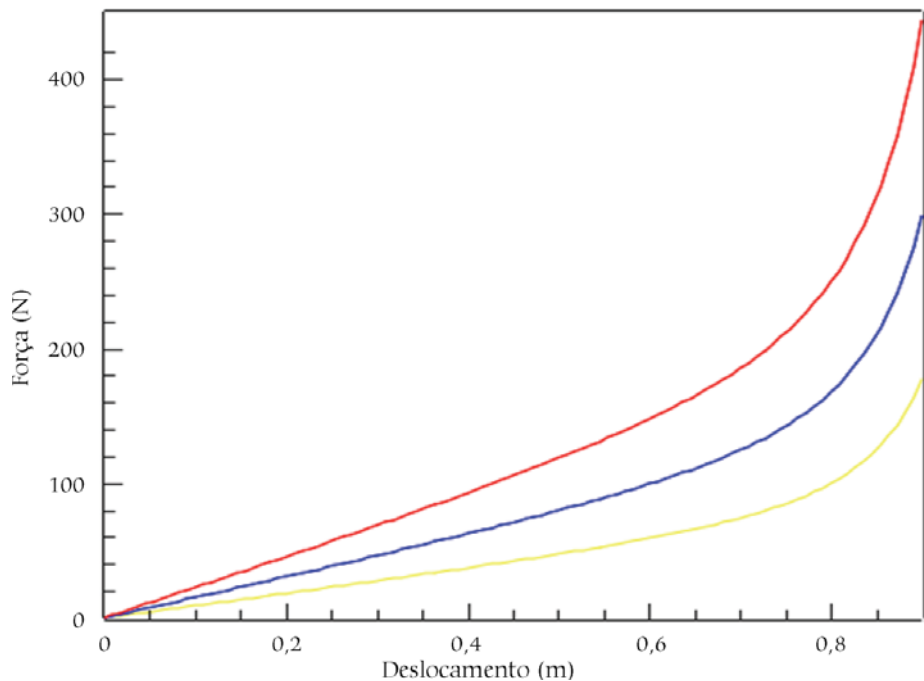
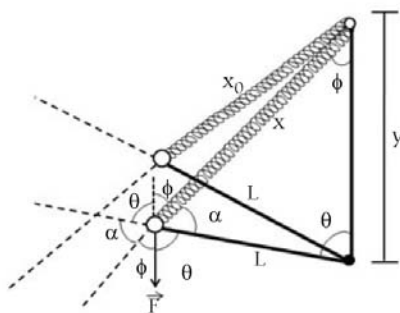


Figura 6: Gráfico relativo à equação da força na Eq. (12), com  $l = 1 \text{ m}$  e  $y = 0,2 \text{ m}$ .



(a)



(b)

Figura 7: Em (a) a foto da cadeira Combo em execução e em (b) o diagrama esquemático das dimensões de comprimentos e ângulos, forças e torques envolvidos.

Entretanto, apenas uma componente dessa força vai exercer um torque no sistema. Quanto mais alto (menor elongação da mola) estiver o ponto de aplicação em relação ao solo, mais se está alinhado com a alavanca e menor será o torque causado pela força; também menor é a força da mola. Conforme a alavanca desce, maior a componente da força que causa torque no sistema e assim também maior será a força feita pela mola.

Ainda é necessário avaliar outra questão, pois, conforme podemos observar na Fig. 2(b), a mola pode ser fixada em diferentes posições, o que acarretará em uma elongação diferente para o mesmo movimento e uma diferença na componente da força responsável pelo torque causado na alavanca. Como exemplo, dois casos extremos:

- 1) Quando a mola está presa no estágio mais alto, praticamente toda a força da mola exerce um torque; entretanto, conforme a alavanca gira, a força vai se alinhando com a mesma e menor será a componente da força elástica que exerce o torque. Neste caso, a mola apresenta uma grande elongação ao final do movimento;
- 2) Quando a mola está presa mais abaixo, ela estará mais alinhada com a alavanca e será menor a componente da força elástica que gera torque. Conforme a alavanca gira, menor ainda será a componente da força da mola responsável pelo torque. Neste caso, a elongação final da mola é menor que no caso anterior.

Assim, combinando os fatores geométricos, verificamos que o deslocamento da mola está relacionado com os parâmetros do aparelho por:

$$x^2 = L^2 + y^2 - 2L \cos\theta \quad (13)$$

Nesse aparelho, é necessário fazermos uma análise dos torques causados pela ação do sujeito e da mola. São esses torques que devem estar em equilíbrio durante o exercício.

$$\tau_F = FL \sin(180^\circ - \theta) \quad (14)$$

$$\tau_m = k(x - x_0)L \sin(\theta + \phi) \quad (15)$$

$$k(x - x_0)L \sin(\theta + \phi) = FL \sin(180^\circ - \theta) \quad (16)$$

É possível perceber que o tamanho da barra desaparece da equação, uma vez que ambas as forças atuam em sua extremidade.

$$F = k(x - x_0) \frac{\sin(\theta + \phi)}{\sin(180^\circ - \theta)} \quad (17)$$

Utilizando a relação trigonométrica para a soma ou diferença de ângulos,

$$\sin(A \pm B) = \sin A \cos B \pm \sin B \cos A \quad (18)$$

obtemos uma expressão para a força.

$$F = k(x - x_0) \frac{\sin\theta \cos\phi + \sin\phi \cos\theta}{\sin 180^\circ \cos\theta - \sin\theta \cos 180^\circ} \quad (19)$$

onde substituímos os valores de seno e cosseno de  $180^\circ$ , ficando com

$$F = k(x - x_0) \frac{\sin\theta \cos\phi + \sin\phi \cos\theta}{\sin\theta} \quad (20)$$

Fazendo uso das relações

$$\cos^2\phi + \sin^2\phi = 1 \Rightarrow \cos\phi = \sqrt{1 - \sin^2\phi} \quad (21)$$

$$\frac{\sin\phi}{L} = \frac{\sin\theta}{x} \quad (22)$$

eliminamos o ângulo  $\phi$  das equações, obtendo:

$$F = k(x - x_0) \left[ \sqrt{1 - \frac{L^2}{x^2} \sin^2\theta} + \frac{L}{x} \cos\theta \right] \quad (23)$$

onde  $x$  pode ser obtido pela Eq. (13).

$$F = k(x - x_0) \frac{L}{x} \left[ \sqrt{\frac{x^2}{L^2} - \sin^2\theta} + \cos\theta \right] \quad (24)$$

Com isso, podemos construir o gráfico mostrado na Fig. 8.

O gráfico da Fig. 8 apresenta o comportamento da força na cadeira Combo em função do deslocamento angular  $\theta$  mostrado na Fig. 7(b). É possível observar dois regimes não lineares e uma descontinuidade abrupta que ocorre a cerca de  $0,85 \text{ rad}$  ( $\sim 49^\circ$ ). A conformação mecânica



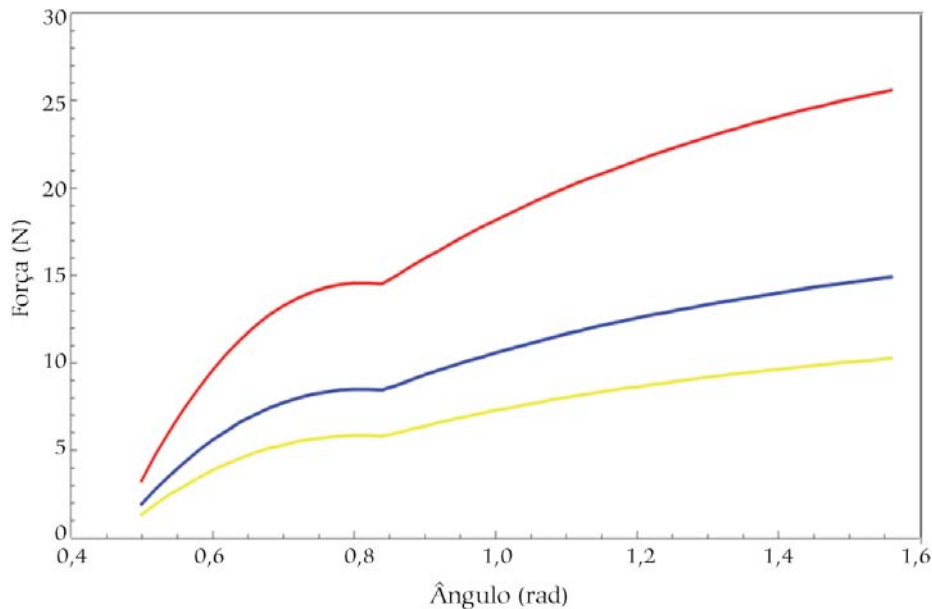


Figura 8: Gráfico do comportamento da força exercida pelo executor do movimento na cadeira Combo.

nica da cadeira Combo é tal que gera uma taxa de crescimento da força em função do deslocamento angular cerca de duas vezes maior dentro do primeiro regime, se comparado ao segundo.

### Considerações finais

Analisamos o comportamento da grandeza força presente no caso de dois tipos de aparelhos usados no método

Pilates de exercício físico. Importante notar que nos dois aparelhos analisados as associações de molas e alavancas permitem a gradação da força no aparelho e que o comportamento dessa grandeza normalmente não é linear durante todo o movimento. Nos casos aqui analisados vemos mais de um regime de comportamento da força em função dos deslocamentos linear e angular. No aparelho Reformer a força tem maior variação dentro do segundo regime do movimento e na cadeira Combo a maior variação da força em função do deslocamento encontra-se na parte inicial do movimento, ou seja, dentro do primeiro regime.

Dessa forma, é possível verificar como os aparelhos de Pilates fornecem exemplos reais que fogem dos tradicionais exemplos que os livros didáticos apresentam para análise. Ainda, devido à configuração dos aparelhos, mesmo que a lei de Hooke se mantenha válida, o deslocamento proporcionado pelo sujeito em ação não é mais linearmente proporcional à força por ele exercida. Acreditamos que essa novidade, aqui apresentada, seja capaz de estimular e desafiar o raciocínio de muitos alunos.

### Agradecimentos

Graciana Azambuja pela revisão, Rui Rosa de Moraes Jr pela verificação das constantes das molas e Estúdio Pilates pela autorização no uso dos equipamentos.

### Referências

- [1] Y.O. Silva, M.O. Melo, L.E. Gomes, A. Bonezi e J.F. Loss, Rev. Bras. de Fisioterapia **13**, 1 (2009).
- [2] H.D. Young e R.A. Freedman, *Física I - Mecânica* (Pearson, São Paulo, 2008) 12ª ed.

### Na Internet

PhysioPilates, <http://physiopilates.com>.



## As contribuições de Benjamin Franklin para a eletricidade no século XVIII

.....  
**Breno Arsioli Moura**

Centro de Ciências Naturais e Humanas, Universidade Federal do ABC, Santo André, SP, Brasil  
E-mail: breno.moura@ufabc.edu.br  
.....

### Introdução

**N**a física, o nome de Benjamin Franklin (1706-1790) (Fig. 1) é usualmente lembrado pelas suas contribuições à eletricidade, especialmente pela criação dos para-raios e pelo famoso experimento da pipa empinada em meio a uma tempestade. Com isso, Franklin marcou seu nome na história como um grande inventor e experimentador, trazendo novas interpretações para os fenômenos elétricos estudados no século XVIII.

Especificamente sobre o experimento da pipa, os relatos são ainda muito comuns nos livros didáticos e de divulgação científica [1]. Eles dão conta de que, em meio a uma forte tempestade, Franklin empinou uma pipa, com uma chave amarrada ao barbante. Com a eletricidade sendo transmitida das nuvens até a chave pelo barbante, ele pôde observar faíscas elétricas e concluir que os raios tinham a mesma natureza da eletricidade produzida

em laboratório. Relatos sobre episódio não são exclusividade do tempo presente. Por exemplo, em um livro de 1882 destinado a ensinar filosofia natural a crianças e jovens estadunidenses, encontramos uma gravura (Fig. 2) mostrando o experimento e a seguinte descrição:

Quem primeiro obteve raios das nuvens? – Dr. Franklin primeiro obteve eletricidade das nuvens de tal maneira a ser capaz de examiná-la e provar que o raio nada mais é que eletricidade.

Como ele fez isso? – Essa descoberta da natureza dos raios foi uma das mais importantes já feitas na ciência e, não obstante, Dr. Franklin a fez simplesmente empinando uma pipa em um temporal com trovões. [2, p. 158]

Porém, é razoável nos perguntarmos: suas únicas contribuições para o estudo da eletricidade foram o experimento da pipa e a invenção dos para-raios? Franklin simplesmente empinou uma pipa em meio a uma tempestade e descobriu que os raios tinham a mesma natureza da eletricidade comum, como sugere o livro de 1882? O estudo da história da ciência nos fornece uma boa resposta a essas questões. Franklin fez muito mais que apenas propor um experimento ou inventar um dispositivo. Imerso em um contexto em que as pesquisas em eletricidade estavam em ascensão, ele propôs a existência de um único fluido elétrico e se esforçou em estabelecer suas propriedades principais. A partir disso, procurou explicar os mais variados fenômenos elétricos estudados na época, expandindo ideias já existentes e criando outras inteiramente novas. Nesse cenário, o experimento da pipa e a ideia dos para-raios fizeram parte de um corpo

Em muitos manuais escolares, Benjamin Franklin é retratado única e exclusivamente como o descobridor da natureza elétrica dos raios, especialmente por meio de seu famoso experimento da pipa. Porém, estudos historiográficos mostram como suas contribuições foram muito mais amplas e que o experimento da pipa desempenhou um papel quase coadjuvante em meio a tantas ideias importantes. Neste artigo, discuto algumas de suas principais teorias, no intuito de esclarecer como Franklin auxiliou a aprimorar os estudos em eletricidade do século XVIII.

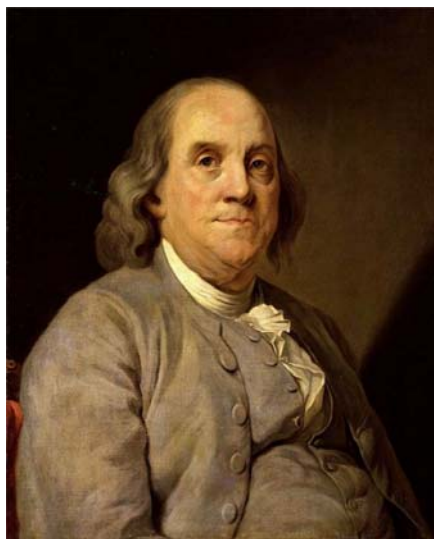


Figura 1: Benjamin Franklin por volta de 1785, em pintura de Joseph Siffred Duplessis (1725-1802).



Figura 2: Gravura ilustrando o experimento da pipa. Fonte: Ref. [2, p. 159].

maior de conhecimentos sobre a eletricidade, que compreendeu outros elementos tão importantes quanto esses.

Neste artigo, discutirei algumas das principais contribuições de Franklin para o desenvolvimento da eletricidade no século XVIII: a concepção de matéria e atmosfera elétricas, o poder das pontas, a eletrização positiva e negativa, o funcionamento da garrafa de Leiden e os experimentos da guarita – relacionado à invenção dos para-raios – e da pipa. Essa discussão será precedida por duas pequenas seções sobre o próprio Franklin e seu envolvimento com a filosofia natural e sobre os estudos em eletricidade no período. Pretende-se, a partir disso, oferecer subsídios para uma abordagem histórica mais adequada sobre Franklin em contextos de sala de aula, bem como proporcionar uma compreensão ampla de suas ideias acerca dos fenômenos elétricos. Isso é especialmente relevante no contexto brasileiro, uma vez que faltam materiais em português sobre o autor.<sup>1</sup>

### Os estudos em eletricidade do início do século XVIII

Franklin começou a se envolver com eletricidade por volta da década de 1740. Nessa época, os estudos na área cresciam em número e em qualidade, aprimorando o pouco que se sabia até então. Quando Franklin iniciou seus estudos sobre os fenômenos elétricos, outros filósofos naturais já tinham descrito algumas de suas principais propriedades e apresentado alguns conceitos para explicá-los. Abordarei as contribuições de alguns desses filósofos naturais a seguir.

Um dos filósofos naturais do início do século XVIII que estudou eletricidade foi Stephen Gray (1666-1736), que escreveu vários artigos sobre o tema entre as décadas de 1700 e 1730. Em um deles, publicado em 1731, Gray relatou a descoberta de que a eletricidade poderia ser transmitida de um corpo a outro e a existência de corpos mais propensos a transmiti-la que

outros. Nesse mesmo texto, ele descreveu o famoso experimento de um garoto suspenso atraindo pequenos materiais por diferentes partes do seu corpo, quando em contato com um tundo de vidro eletrizado (Fig. 3) [3].

Na mesma época de Gray, surgiram os estudos de Charles Du Fay (1698-1739). Du Fay reconheceu a repulsão como uma propriedade característica da eletricidade e descreveu o mecanismo ACR (atração-contato-repulsão). Ele propôs a existência de dois tipos de eletricidade: vítrea e resinosa. Como os nomes sugerem, a eletricidade vítrea poderia ser obtida quando o vidro era atritado, enquanto a resinosa estava presente em resinas como a copal. Corpos com a mesma eletricidade se repeliam e com eletricidades diferentes se atraíam [5]. Mais tarde, outros filósofos naturais, como John Canton (1718-1772), mostraram que o tipo de eletrização não dependia apenas do corpo atritado, mas também daquele que atritava.

Outro filósofo natural que se destacou por suas contribuições à eletricidade foi William Watson (1715-1787). Na década de 1740, ele reportou aos colegas da *Royal Society* de Londres os resultados de vários experimentos elétricos e, entre 1745 e 1746, publicou o *Experiments and Observations tending to illustrate the Nature and Properties of Electricity* [Experimentos e observações buscando ilustrar a natureza e as propriedades da eletricidade]. No ano seguinte, o texto ganhou a famosa *Sequel* [Sequência], que ampliou os estudos do material anterior. Nesses trabalhos, Watson discutiu vários fenômenos elétricos conhecidos, relatando, por exemplo, a diferença nas descargas obtidas por corpos pontudos e corpos embotados [6, p. 298].

Na França, um dos herdeiros dos estudos de Du Fay foi Jean-Antoine Nollet (1700-1770). Ele desenvolveu o conceito de um único fluido elétrico, que saía e entrava nos corpos eletrizados, como um fluxo. Um corpo eletrizado emitiria ao mesmo tempo correntes “afluente” e

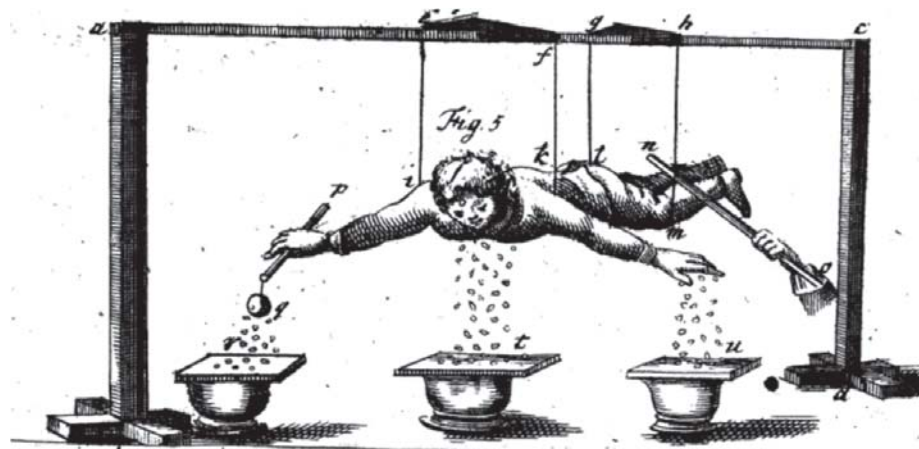


Figura 3: O famoso experimento de Gray, ilustrado em trabalho posterior à publicação de seus artigos. Fonte: Ref. [4].



“efluente” do fluido elétrico, as quais, ao interagir com outras correntes de diferentes intensidades em outros corpos, ocasionariam os fenômenos elétricos conhecidos [7]. O famoso experimento da pena flutuando ao redor de um tubo de vidro atritado seria facilmente explicado por esse princípio. A atração seria ocasionada pela corrente afluyente. Ao tocar o tubo, a pena seria estimulada a emitir suas próprias correntes, originando a repulsão pelas correntes da pena e do tubo.

Na mesma década de 1740, uma importante descoberta foi feita. Tratou-se do instrumento que ficou conhecido como “garrafa de Leiden”. A construção da garrafa foi guiada pelos experimentos de Georg Mathias Bose (1710-1761), que havia eletrizado a água dentro de um copo de vidro e extraído faíscas dela. Buscando aprimorar os efeitos observados por Bose, Ewald Jürgen von Kleist (1700-1748), alemão, e Pieter von Musschenbroek, holandês (1692-1761), em duas situações distintas [8, 9],<sup>2</sup> desenvolveram o que viria a ser chamado de garrafa de Leiden.<sup>3</sup> Basicamente, a garrafa funcionava como um tipo primário de capacitor, podendo acumular eletricidade por um longo tempo. Em suas configurações iniciais, ela consistia de um recipiente de vidro preenchido com água e envolvido interna e externamente por um material condutor. Um fio que saía da garrafa conectava o revestimento condutor interno com o gerador de eletricidade (Fig. 4).

A invenção da garrafa de Leiden foi mais um fator que impulsionou os estudos na área, pois muitos queriam entender como um dispositivo tão simples poderia armazenar eletricidade por um tempo tão longo. Nos anos seguintes, vários filósofos naturais conseguiram descrever as principais propriedades da garrafa e os efeitos que ocasionava [6, p. 316-321]. Nesse momento, apareceram os primeiros estudos de Franklin.

### Benjamin Franklin e a eletricidade

Os primeiros passos de Franklin na eletricidade foram dados em meados de 1743. Nesse ano, ele assistiu a conferências do reverendo escocês Archibald Spencer (1698?-1760), que discutiu, dentre outros assuntos, alguns fenômenos elétricos. Dois anos mais tarde, Peter Collinson (1694-1768), frequente colaborador de Franklin e seus companheiros estadunidenses, enviou como presente uma descrição de “experimentos alemães” e um tubo de vidro com instruções para realizar alguns fenômenos elétricos. Os “experimentos alemães” traziam, principalmente, as ideias de Bose. Inspirado por esses



Figura 4: Típica configuração de uma garrafa de Leiden, com seus dois revestimentos de condutor (A e B), produzida anos mais tarde de sua invenção. Nos modelos iniciais, a garrafa era preenchida com água, ligando o fio com o revestimento interno. Fonte: Ref. [10, p. 86].

eventos, Franklin e seus companheiros começaram a realizar suas próprias investigações em eletricidade.

Em 1747, Franklin enviou suas primeiras comunicações sobre eletricidade a Collinson. Nelas, discutiu aqueles que se tornariam seus principais conceitos, tais como: teoria de um único fluido elétrico, atmosfera elétrica, poder das pontas e a eletrização positiva e negativa. Nos anos seguintes, Franklin continuou a enviar cartas a Collinson, uma delas contendo o que provavelmente foi seu mais importante ensaio em eletricidade, o texto *Opinions and conjectures concerning the properties and effects of the electrical matter* [Opiniões e conjecturas sobre as propriedades e efeitos da matéria elétrica], escrito em 1749. Nesse trabalho, Franklin aprofundou conceitualmente suas ideias e apresentou experimentos novos, incluindo o famoso experimento da guarita, desenvolvido para demonstrar que as nuvens em tempestades estavam eletrizadas. Resumi-

**A a garrafa de Leiden funcionava como um tipo primário de capacitor, podendo acumular eletricidade por um longo tempo**

damente, o experimento consistia em erguer uma longa haste metálica no topo de um prédio alto e extrair a eletricidade de nuvens em tempestades. Ele tinha esse nome por conta da guarita em que o observador ficava. Dois anos mais tarde, Collinson reuniu em um livro todas as comunicações que Franklin lhe enviara, sob o título *Experiments and observations on electricity, made at Philadelphia* [Experimentos e observações em eletricidade, feitos na Filadélfia], publicado em 1751.<sup>4</sup> O livro teve outras cinco edições, sendo a quarta a primeira a ter sido organizada pelo próprio Franklin e a utilizada como fonte para as citações neste artigo [12].

A publicação do *Experimentos e observações* em 1751 tornou o trabalho de Franklin mais divulgado na Europa. Na Grã-Bretanha, seus escritos já eram relativamente conhecidos, uma vez que Collinson comunicava frequentemente aos membros da *Royal Society* de Londres – da qual fazia parte – os textos do estadunidense. Na França, o livro fez bastante sucesso, por conta, dentre outros motivos, da reprodução de experimentos descritos por Franklin, em especial o experimento da guarita (Fig. 5).

A repercussão de suas ideias o levou a receber a medalha Copley da *Royal Society* em 1753, por suas contribuições à eletricidade, e a tornar-se membro dessa sociedade, em 1756. Ao final dessa década, Franklin não produziu nenhum outro trabalho relevante na área, dedicando-se a outros assuntos. Mesmo assim, continuou recebendo homenagens e desfrutou de grande prestígio dentre os filósofos naturais. Uma de suas últimas honrarias foi a eleição como membro estrangeiro da *Académie Royale des Sciences*, em 1772. Quando morreu, em 1790, era uma figura ilustre e conhecida, ganhando várias biografias, relatos e reverências póstumas.

### Principais conceitos e experimentos

Nesta seção, apresento os principais conceitos e experimentos em eletricidade desenvolvidos por Franklin e publicados no *Experimentos e observações*. Busco apontar não apenas seus aspectos favoráveis, mas também suas falhas, sempre à luz do contexto em que foram produzidos. Isso significa que a análise das ideias de Franklin procura evitar anacronismos e interpretações distorcidas que vangloriem o autor em detrimento de um estudo mais cuidadoso de suas contribuições.

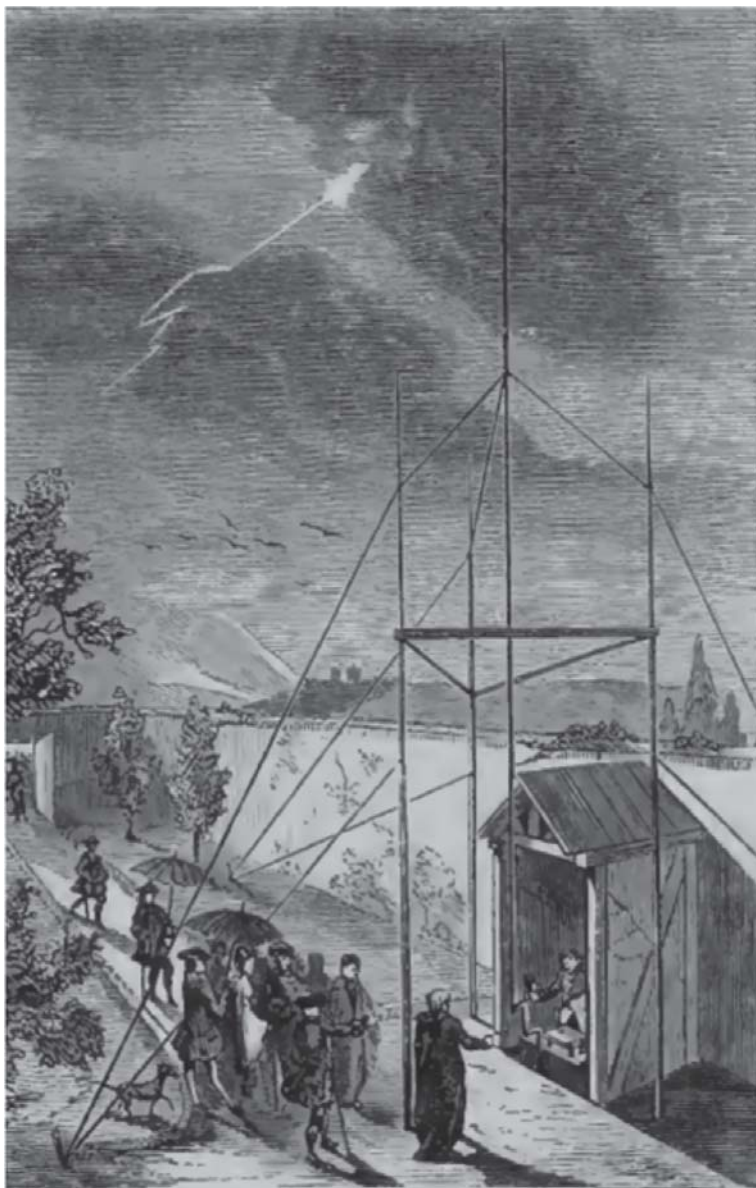


Figura 5: Reprodução do experimento da guarita na França, em 1752. Por meio desse experimento, era possível atestar a natureza elétrica dos raios em tempestades. Pela figura, é possível notar o observador dentro da guarita e a longa haste metálica. Fonte: Ref. [13, p. 291].

Para facilitar a leitura da discussão abaixo, que envolve termos e ideias do século XVIII, listo algumas informações importantes:

- No início do século XVIII, o eletromagnetismo enquanto área de estudo não existia. Fenômenos da eletricidade e do magnetismo eram estudados por vias diferentes, embora os filósofos naturais notassem algumas semelhanças entre eles – a atração e a repulsão, por exemplo.
- Não existia o conceito de campo elétrico. A ideia de atmosferas elétricas de Franklin não pressupunha um tipo primordial de campo, pois ela

envolvia a existência de partículas de matéria elétrica ao redor do corpo.

- Nem Franklin nem seus coetâneos pensou em elétrons ou prótons. A ideia de matéria, fluido ou fogo elétrico era semelhante à da matéria que formava os corpos naturais. A eletrização positiva e negativa tinha relação com o excesso ou a falta de matéria elétrica.
- Os objetos isolantes eram chamados de “elétricos”, pois conseguiam ser eletrizados. Consequentemente, objetos condutores eram chamados de “não elétricos”. Na época, o termo “condutor” já existia, mas Fran-

klin chamou objetos desse tipo de “não elétricos”.

### **A matéria e a atmosfera elétricas**

Para Franklin, os fenômenos da eletricidade eram causados pela manifestação de um fluido elétrico elástico, sutil e impossível de ser criado ou destruído. Partículas dessa matéria elétrica se repeliam, mas eram fortemente atraídas pela matéria comum. Por isso, havia matéria elétrica em todos os corpos naturais. A eletrização de um corpo dependeria da ausência ou excesso de fluido elétrico nesses corpos. A garrafa de Leiden seria uma das principais evidências da existência de um tipo particular de matéria, uma vez que ela demonstrava que *algo* poderia ser armazenado, sendo distinto de outras matérias, pelos efeitos que gerava [12, p. 306-309].

Franklin afirmou que os corpos seriam como “esponjas” para a matéria elétrica. Quando fornecíamos a eles um excesso de matéria elétrica, essa não era empurrada para seus interiores, mas ficava ao redor deles, formando o que Franklin denominou de “atmosferas elétricas”. Assim como a água transbordava de uma esponja já cheia, a matéria elétrica excedente “transbordava” ao redor do corpo eletrizado. Daí a analogia com as esponjas. Embora o conceito de atmosferas elétricas também possa ser encontrado em outros filósofos naturais anteriores a Franklin, ele foi o primeiro a empregá-lo para explicar a interação entre corpos eletrizados. Outra contribuição original foi atribuir às atmosferas elétricas a mesma forma do corpo eletrizado que envolvia.

### **O poder das pontas**

O segundo conceito fundamental trabalhado por Franklin foi o poder das pontas. Segundo ele, corpos pontudos – como um punhal ou uma agulha – tinham a propriedade de *extrair* ou *lançar* fluido elétrico de corpos eletrizados. Um dos experimentos descritos por ele envolveu uma bala metálica (de armas de fogo) sobre a boca de um frasco de vidro eletrizado e uma bola de cortiça em contato com ela. Após a eletrização, a bola e a bala se repeliam. Se a ponta de um punhal fosse aproximada, a repelência seria “destruída” e as duas voltavam a se tocar. Nesse caso, Franklin acreditava que a ponta extraía o fluido da bala e da bola, eliminando a repelência. Na segunda carta a Collinson, enviada em 1747, ele discutiu outras variantes, incluindo casos em que as pontas lançavam fluido elétrico e impediam a eletrização dos materiais.

Para mostrar que as pontas lançarão assim como extrairão o fogo elétrico coloque uma agulha longa e afiada sobre a bala [de ferro] e você não poderá eletrizá-la, de modo que a faça repelir a bola de cortiça. Ou coloque uma agulha no final de um cano de uma arma suspenso ou de uma barra de ferro, de modo que ela aponte para além [do cano ou da barra] como uma pequena baioneta. E, enquanto permanece lá, o cano da arma ou a barra não podem, aproximando o tubo à outra extremidade, ser eletrizados, de maneira a dar em uma faísca, [pois] o fogo [elétrico está] continuamente saindo da ponta de forma silenciosa. No escuro, você pode vê-lo fazer a mesma aparição que faz no caso antes mencionado [12, p. 5].

No ensaio *Opiniões e conjecturas*, Franklin forneceu mais detalhes sobre o comportamento do fluido elétrico em corpos pontudos, utilizando como exemplo um corpo em forma de pentágono irregular. Na Fig. 6, extraída do *Experimentos e observações*, notamos que o corpo está rodeado por uma atmosfera elétrica, representada pela parte tracejada.

Para Franklin, a matéria do corpo exercia forte atração pela matéria elétrica, mas a parte mais pontuda da atmosfera – compreendida por L e M – estaria mais distante do corpo, resultando em uma atração menor sobre a matéria elétrica. Atração menor somada à inerente repulsão entre a matéria elétrica fariam com que fosse mais fácil corpos não eletrizados próximos extraí-la, por atração. Ele concluiu:

Nessas considerações, supomos que corpos eletrizados descarregam mais facilmente suas atmosferas em corpos não eletrizados, e a uma maior distância de seus ângulos e pontas que a partir de seus lados lisos. Aquelas pontas descarregarão também no ar, quando o corpo possuir demasiada atmosfera elétrica, sem aproximar qualquer [cor-

po] não-elétrico para receber o que é lançado. Pois, o ar, embora um elétrico per se, ainda tem sempre mais ou menos água e outras matérias não elétricas misturadas a ele, e essas atraem e recebem o que é então descarregado [12, p. 60].

Embora a explicação de Franklin sobre como corpos pontudos eletrizados perderiam facilmente seu fluido elétrico tenha sido elegante e intuitiva, a situação inversa não contou com abordagem semelhante. Franklin buscou comparar como corpos pontudos e embotados não eletrizados extrairiam fluido elétrico de corpos eletrizados, baseando-se em uma analogia com arrancar pelos da crina de um cavalo. Para ele, corpos pontudos extraíam fluido elétrico aos poucos, como se arrancássemos pelo por pelo da crina. Em contrapartida, corpos embotados extraíam fluido elétrico de uma vez só, como se arrancássemos um punhado de pelos da crina em um único momento, ou seja, algo muito mais difícil. Franklin não forneceu outros detalhes, o que sugere a dificuldade em estabelecer uma explicação tão coerente quanto a anterior. Logo após descrever essa ideia, ele reconheceu sua fragilidade:

Essas explicações do poder e do funcionamento das pontas, quando me ocorreram pela primeira vez, e enquanto inicialmente flutuaram em minha mente, pareceram perfeitamente satisfatórias. Mas, agora que eu as escrevi, e as considerei mais de perto em preto e branco, devo confessar que tenho algumas dúvidas sobre elas. Ainda assim, como agora não tenho nada melhor para oferecer no lugar delas, não as descarto. Pois, mesmo uma solução ruim lida, e suas falhas descobertas, tem muitas vezes dado origem a uma boa [solução] na mente de um leitor engenhoso [12, p. 62].

**Para Franklin, corpos pontudos tinham a propriedade de extrair ou lançar fluido elétrico**

com menos do que naturalmente possuiria e, portanto, eletrizado negativamente.

Para mostrar a validade de seu argu-

mento, Franklin discutiu um experimento envolvendo três pessoas, duas delas sobre um suporte de cera – portanto, isoladas – e a terceira em contato com o chão. Uma das pessoas sobre a cera atritava um tubo de vidro e a segunda tocava apenas o tubo. Como essas duas estavam isoladas sobre a cera, as únicas fontes de fluido elétrico eram elas mesmas e o tubo de vidro. O atrito no tubo fazia com que a pessoa que o atritava perdesse fluido elétrico para ele, ficando eletrizada negativamente. Já a pessoa em contato com o tubo receberia esse fluido elétrico excedente, ficando eletrizada positivamente. Portanto, teríamos duas pessoas com quantidades de fluido elétrico diferentes, uma com um excesso e outra com escassez. Se essas duas pessoas se tocassem, um forte choque seria sentido. Se qualquer uma delas tocasse a terceira pessoa, com sua quantidade natural de fluido elétrico, outro choque seria sentido, embora menos intenso. Em suas próprias palavras, disponíveis na segunda carta a Collinson, de 1747, Franklin disse:

Nós supomos, como citado anteriormente, que o fogo elétrico é um elemento comum, do qual cada uma das três pessoas mencionadas anteriormente possui quantidades iguais, antes de qualquer operação ser iniciada com o tubo. [A pessoa] A, que está sobre a cera e fricciona o tubo, coleta o fogo elétrico a partir de si mesma para o vidro; e sendo sua comunicação com a reserva comum [o chão] impedida pela cera, seu corpo não é imediatamente

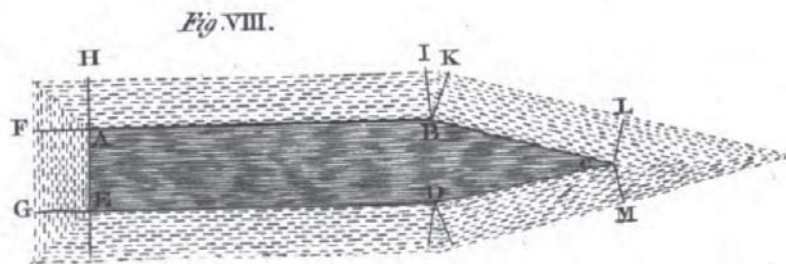


Figura 6: A atmosfera elétrica ao redor de um corpo pontudo. Aquela compreendida por L e M sofreria menor atração da matéria do corpo. Fonte: Ref. [12, Plate I].



suprido [*de fogo elétrico*] de novo. [*A pessoa*] B (que também está sobre a cera), passando o nó de seu dedo próximo ao tubo, recebe o fogo que foi coletado a partir de A pelo tubo; e sua comunicação com o estoque comum sendo da mesma forma impedida, retém a quantidade adicional recebida. Para [*a pessoa*] C, estando no chão, ambos parecem estar eletrizados. Pois, possuindo somente a quantidade média de fogo elétrico, recebe uma faísca ao se aproximar de B, que possui uma quantidade excedente, mas dá [uma faísca] para A, que possui uma quantidade inferior. Se A e B se aproximam para se tocar, a faísca é mais forte, porque a diferença entre eles é maior. Depois de tal toque, não há nenhuma faísca entre eles e entre C, porque o fogo elétrico em todos foi reduzido à igualdade original [12, p. 8].

Em uma segunda situação, caso as duas pessoas sobre a cera se tocassem durante a fricção no tubo, nada aconteceria, pois o fluido elétrico teria apenas circulado por elas e o tubo. Sendo assim, estava confirmado para Franklin que a eletrização positiva ou negativa nada mais seria que um rearranjo das quantidades de fluido elétrico.

Novamente, argumentos semelhantes podem ser encontrados em outros autores do período,

**Franklin acreditava que o vidro desempenhava um papel fundamental no carregamento da garrafa de Leiden**

como Watson. Em sua *Seqüência*, ele já havia mencionado que os tubos funcionavam como bombas, sugando a eletricidade do chão para corpos não elétricos isolados. Dessas observações, ele aparentemente não concluiu nada relevante [6, p. 299, 329]. O próprio Franklin comentou em sua carta que Watson demonstrara algo similar, mas que se enganara em suas conclusões.

O conceito de eletrização positiva e negativa enfrentava um problema quando associado à ideia de atmosferas elétricas. Sabia-se que corpos com o mesmo tipo de eletrização se repeliam, o que era facilmente explicado no caso da eletrização positiva. Ambos com excesso de matéria elétrica se repeliam porque a repulsão natural entre partículas desse tipo era amplificada. Porém, como explicar a repulsão entre corpos eletrizados negativamente, quando não há atmosfera elétrica ou mesmo a quantidade natural de fluido elétrico neles? E a atração de corpos eletrizados negativamente com corpos neutros? Uma proposta de solução a esse problema foi dada mais tarde por Franz Aepinus (1724-1802), que sugeriu a existência de repulsão entre partículas da matéria comum

[15, p. 851]. Quando a matéria elétrica estava no corpo, as repulsões entre partículas do mesmo tipo – elétrica e comum – seriam atenuadas; porém, ao retirá-las dos corpos em uma eletrização negativa, a repulsão entre partículas de matéria comum se sobressaía. Dessa forma, dois corpos eletrizados negativamente se repeliam por conta da repulsão entre as partículas de matéria comum de cada um, enquanto um corpo eletrizado negativamente atraía um neutro por conta da presença de matéria elétrica nesse último. Franklin não comentou as alterações de Aepinus, provavelmente porque nessa época – final da década de 1759 – ele já não estava tão envolvido com a filosofia natural quanto antes.

### O funcionamento da garrafa de Leiden

Um dos pontos altos dos estudos de Franklin em eletricidade foram seus experimentos com garrafas de Leiden ou objetos similares (Fig. 7). É importante frisar que Franklin não utilizou o termo “garrafa de Leiden” nos escritos, fazendo referência a “frascos de vidro” ou “garrafa de Musschenbroek”. Em 1747 e 1748, ele enviou a Collinson duas cartas descrevendo uma série de experimentos com as garrafas. Uma explicação mais detalhada para o funcionamento delas foi descrita no *Opiniões e conjecturas*, enviado em 1749.

Segundo Franklin, o aspecto fundamental da garrafa era o vidro. Pelo fato de o vidro atrair fortemente a matéria

elétrica, a única maneira de movê-la seria revestir suas duas superfícies com materiais não elétricos, ou seja, condutores. Quando um condutor primário transmitia fluido elétrico pelo fio da garrafa, ou seja, a carregava, esse fluido excedente gerava uma atmosfera elétrica sobre a superfície de vidro interna, mas espalhada pelo não elétrico interno. Para Franklin, isso eletrizava positivamente esse superfície e, pela repelência entre as partículas da matéria elétrica, o fluido elétrico da superfície externa era “empurrado” para fora, em direção ao não elétrico externo. Estando este aterrado, o fluido elétrico era transmitido ao chão, deixando a superfície externa do vidro eletrizada negativamente. A garrafa estava, portanto, efetivamente carregada. No “Opiniões e conjecturas”, ele escreveu:

Nem nós temos nenhuma maneira de mover o fluido elétrico no vidro, a não ser uma; que é por cobrir parte das duas superfícies do vidro fino com [*materiais*] não-elétricos, e então jogando uma quantidade adicional desse fluido [*elétrico*] em uma superfície, que espalhando-se no não-elétrico, e sendo limitado por ele até aquela superfície, age, por sua força repulsiva, nas partículas de fluido elétrico contidas na outra superfície [*do vidro*], e as leva para fora do vidro para o não-elétrico daquele lado, de onde são descarregadas e, [*para que*] em seguida, aquelas adicionais no lado carregado possam entrar. Mas, quando isso é feito, não há mais [*fluido elétrico*] no vidro, nem menos do que antes, somente o tanto que saiu de um lado e foi recebido do

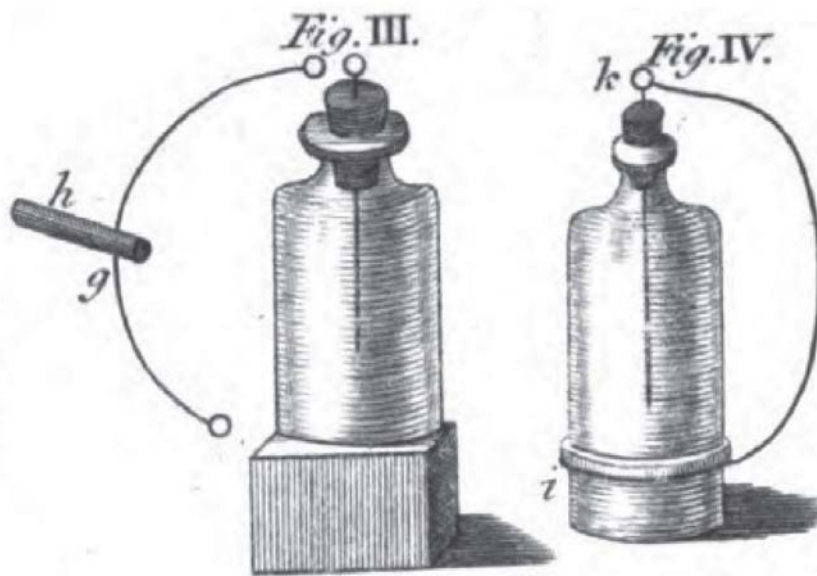


Figura 7: Garrafas de Leiden utilizadas por Franklin. Fonte: Ref. [12, Plate 1].

outro [12, p. 75].

Nesse sentido, não havia inserção propriamente de fluido na garrafa, uma vez que sua quantidade total permanecia a mesma. Estar carregada significava que uma superfície tinha um excedente de fluido e outra uma falta. A descarga produzida pela garrafa tratava-se, assim, do reestabelecimento do equilíbrio de fluido elétrico nas duas superfícies do vidro.

O aspecto fundamental da ideia de Franklin era que não havia passagem de fluido elétrico de uma superfície de vidro a outra. Ele propôs que as duas superfícies compreendiam exatamente a metade da espessura do vidro e que não poderia passar fluido elétrico pela linha divisória entre as duas (Fig. 8).

Para Franklin, isso tinha relação com o resfriamento do vidro em seu processo de fabricação, o que deixava seus poros muito estreitos. A repelência entre os fluidos de um lado e de outro, contudo, poderia ser comunicada.

Mas, eu suponho mais, que no resfriamento do vidro, sua textura se torna mais próxima no meio, e forma uma espécie de partição, na qual os poros são tão estreitos que as partículas do

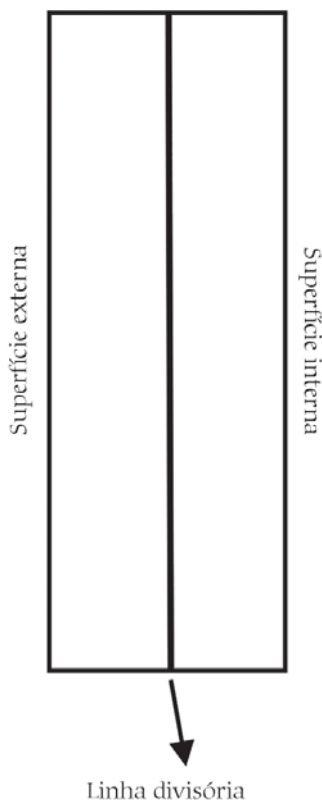


Figura 8: Segundo Franklin, as superfícies do vidro em uma garrafa de Leiden, por exemplo, compreendiam exatamente a metade de sua espessura. Fonte: elaborado pelo autor.

fluido elétrico, que entram em ambas as superfícies ao mesmo tempo, não podem atravessar, ou passar e repassar de uma superfície a outra, e então se misturarem. No entanto, embora as partículas do fluido elétrico, embebidas por cada superfície, não podem elas mesmas passar através daquelas [partículas] da outra [superfície], sua repelência pode, e, por isso, significa que agem umas sobre as outras [12, p. 76-77].

Ainda que a ideia de Franklin sobre a interação entre os fluidos elétricos nas superfícies interna e externa guarde semelhança com os modernos conceitos de indução elétrica, ressalto que esses só foram plenamente desenvolvidos no século XIX. De modo geral, os argumentos de Franklin são coerentes com o comportamento da garrafa, mas eles não escapam de alguns problemas. Em sua argumentação, ele afirmou que cada superfície do vidro tinha metade de sua espessura total, mas não explicou por que a divisão ocorria exatamente no meio. Ademais, a razão pela qual a repelência entre os fluidos elétricos em cada superfície permanecia após essa divisão não foi comentada. Posteriormente, Franklin reconheceu a fragilidade dessa hipótese [14, p. 476, n. ‡], embora ela não deixe de ser bastante inventiva e elucidativa.

### Os experimentos da guarita e da pipa

A descrição dos experimentos da guarita e da pipa tem relação com duas discussões anteriores de Franklin: o poder das pontas e a formação dos temporais com raios e trovões. Essa última foi examinada em uma carta de 1749, endereçada a John Mitchel (1711-1768) [16]. Nela, Franklin comentou sobre como seriam formadas nuvens eletrizadas, a partir do vapor d'água vindo do mar. Resumidamente, ele considerou as nuvens como grandes reservatórios de eletricidade e os raios uma consequência da transferência de fluido elétrico de uma nuvem eletrizada para um obstáculo não eletrizado, fosse uma nuvem, montanha ou mesmo uma árvore ou edifício. Nessa carta, ele fez, pela primeira vez, uma associação mais detalhada entre os raios e as faíscas obtidas por garrafas de Leiden.

O experimento da guarita buscava determinar se as nuvens em temporais com raios e trovões estavam eletrizadas ou não. Ele foi descrito no "Opiniões e conjecturas" e respaldava-se no seguinte ar-

ranjo: uma guarita era colocada acima de um edifício alto e dentro dela ficava uma pessoa sobre um suporte isolante, do qual sairia uma longa haste metálica pontuda, apontada para o céu (Fig. 9). Quando nuvens passassem próximas à haste pontuada, pelo seu poder de extrair fluido elétrico, este seria transmitido ao longo dela e o homem poderia observar faíscas ao aproximar os nós dos dedos. Ele continuou:

Se algum perigo ao homem for percebido (embora acho que não existiria nenhum), deixe ele ficar no chão de sua guarita, e ocasionalmente traga para perto da haste o laço de um fio que possui uma das extremidades amarradas aos fios condutores [aterrados], ele o segurando por um cabo de cera, tal que as faíscas, se a haste for eletrizada, golpeará da haste para o fio, e não o afetará [12, p. 66].

Pela descrição, é possível perceber que Franklin não considerava o experimento demasiadamente perigoso. Isso porque possivelmente ele imaginava que a haste

coletaria o fluido elétrico silenciosamente, não por meio de uma descarga abrupta. Franklin não cogitou a incidência de

**O experimento da guarita tinha o propósito de determinar se as nuvens em tempestades estavam eletrizadas**

um raio sobre a haste, o que certamente traria risco à vida do experimentador. Portanto, o experimento da guarita não é um para-raios, tendo sido desenvolvido especialmente para verificar a eletrização



Figura 9: O experimento da guarita, ilustrado no *Experimentos e observações*. Fonte: Ref. [12, Plate 1].

das nuvens. Uma adaptação do experimento para torná-lo um para-raios envolveria aterrar a haste ao solo, o que Franklin sugeriu alguns trechos antes:

Eu digo, se essas coisas são assim, não poderia o conhecimento desse poder das pontas ser útil para a humanidade, em preservar casas, igrejas, navios etc. do alcance dos raios, por nos direcionar a fixar nas partes mais altas desses edifícios hastas verticais de metal, feitas afiadas como uma agulha e douradas para prevenir o enferrujamento, e do pé dessas hastas um fio para baixo do exterior do prédio, para o chão, ou para baixo ao redor de uma das mortalhas de um navio, e para baixo ao lado dela até que ela atinja a água? Essas hastas pontudas provavelmente não extrairiam o fogo elétrico silenciosamente de uma nuvem antes que ela chegasse perto o suficiente para golpear, e assim nos asseguraríamos desse mal mais súbito e terrível? [12, p. 65-66]

Como apontei anteriormente, o experimento da guarita foi reproduzido de maneira bem-sucedida pelos franceses. Porém, nem todas as reproduções foram exitosas. Georg Richmann (1711-1753) morreu após repetir o experimento em São Petersburgo, provavelmente porque não utilizou um suporte isolante [17, p. 85] (Fig. 10). Para piorar, alguns temiam os efeitos dos para-raios, acreditando, por exemplo, que ao aterrar a haste, os raios seriam acumulados no solo, ocasionando terremotos [14, p. 511]. Apesar desses percalços, o sucesso do experimento em mostrar que as nuvens em temporais com raios e trovões estavam eletrizadas era evidente, contribuindo para tornar Franklin célebre na Europa.

O experimento da pipa foi uma variação do experimento da guarita. Aparentemente, Franklin tinha em mente uma proposta mais prática para verificar a eletrização das nuvens, que não envolvesse todo o aparato de construir uma guarita no alto de um edifício. Em uma carta sucinta a Collinson, enviada em 1752, ele deu direções sobre como construir a pipa para esse fim:

Faça uma pequena cruz de duas tiras de cedro, os braços tão longos de forma a alcançar os quatro cantos de um largo lenço fino de seda quando estendido. Amarre os cantos do lenço às extremidades da cruz, de modo que tenha o corpo de uma pipa, a qual sendo supri-

da com uma cauda, laço e barbante, subirá no ar, como aquelas feitas de papel. Porém, essa sendo feita de seda, é mais apropriada para enfrentar a umidade e vento de uma tempestade com raios e trovões sem rasgar. No topo da tira vertical da cruz deve ser afixado um fio pontudo muito afiado, erguendo-se um pé [ $\approx 30\text{ cm}$ ] ou mais acima da madeira. Ao final do barbante, próximo à mão, deve ser amarrado um laço de seda, e onde a seda e o barbante se unem, uma chave deve ser amarrada. [12, p. 111-112]

Ao empinar a pipa em meio a um temporal com raios e trovões, seria possível coletar faíscas ao aproximar os nós dos dedos à chave ou mesmo carregar uma garrafa de Leiden (Fig. 11). Há indícios de que teria feito o experimento antes de ouvir sobre os relatos

franceses sobre o experimento da guarita [17, p. 69], mas até os dias atuais não há certeza de que isso realmente ocorreu.

De qualquer forma, não parece que a pipa tenha desempenhado um papel fundamental, como as anedotas populares sugerem. Ainda que mais prático, o experimento da guarita era, sem dúvida, mais seguro. Em sua autobiografia, Franklin se referiu ao experimento da pipa apenas

**O experimento da pipa foi uma adaptação do experimento da guarita**



Figura 10: Morte de Richmann, após tentar reproduzir os experimentos de Franklin. Esse evento diminuiu o entusiasmo a respeito da invenção de Franklin, mas não minimizou sua importância entre os filósofos naturais. Fonte: Ref. [13, p. 293].



Figura 11: “Franklin extraindo eletricidade do céu” (c. 1816), de Benjamin West (1738-1820). Esse quadro ilustra como o experimento da pipa enraizou-se no imaginário popular sobre os cientistas, mesmo ele não tendo tido tamanha importância para o próprio idealizador. Fonte: *Philadelphia Museum of Art*. Disponível em: <https://www.philamuseum.org/collections/permanent/57044.html> (acesso em março de 2018).

como um caso “similar” ao da guarita, este sim, classificado como “capital” para o estabelecimento de novas propriedades da eletricidade [18, p. 121].

Mas, por que o experimento ficou tão famoso? Isso provavelmente se deveu a Joseph Priestley (1733-1804), que publicou um livro sobre história da eletricidade em 1767, com a contribuição de vários estudiosos na área, incluindo Franklin. No livro, ele deu a entender que Franklin efetivamente fez o experimento, mas não o comunicou por receio de ser ridicularizado. Segundo Priestley, “isso aconteceu em junho de 1752, um mês depois que os eletricitistas na França tinham verificado a mesma teoria, mas antes de ele ter ouvido qualquer coisa que eles tivessem feito” [19, p. 181]. Outros historiadores replicaram essa história, levando à conhecida anedota sobre Franklin e o experimento da pipa [1, p. 152].

**Conclusão**

Os estudos de Franklin sobre a eletricidade influenciaram muitos filósofos naturais posteriores e contribuíram significativamente para uma maior compreensão dos fenômenos elétricos. Mais que apenas empinar uma pipa ou apresentar



a ideia de para-raios, Franklin desenvolveu um conjunto de conceitos para a eletricidade, imerso em um contexto em que os estudos nessa área avançavam.

Este artigo buscou trazer uma imagem mais adequada das contribuições de Franklin para os estudos em eletricidade do início do século XVIII. Acredito que, dessa maneira, seja possível evitar uma abordagem demasiadamente idealizada

de suas realizações, considerando-o como um homem de seu tempo, que estudou os principais fenômenos conhecidos e propôs explicações a eles, contrapondo algumas ideias vigentes e elaborando outras novas. Entender mais corretamente o papel de Franklin para a história da eletricidade pode abrir caminhos para compreendermos a natureza do conhecimento científico,

subsidiando abordagens mais críticas no ensino.

### Agradecimentos

O autor agradece a colaboração inicial de Thátuyse Bonfim e o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP, processo 2014/08359-0) para a realização das pesquisas que originaram este trabalho.

### Referências

- [1] C.C. Silva e A.C. Pimentel, Caderno Brasileiro de Ensino de Física **25**, 141 (2008).
- [2] L.R.C. Cooley, *Natural Philosophy for Common and High Schools* (Charles Scribner's Sons, New York, 1882).
- [3] S.L.B. Boss, A.K.T. Assis and J.J. Caluzi, *Stephen Gray e a Descoberta dos Condutores e Isolantes: Tradução Comentada de seus Artigos sobre Eletricidade e Reprodução de seus Principais Experimentos* (Cultura Acadêmica, São Paulo, 2012).
- [4] J.G. Doppelmayer, *Neu-entdeckte Phänomene von Bewunders-würdigen Würckungen der Natur* (Nuremburg, 1774), tab. II, disponível em [http://books.google.com.br/books?id=ek1NAAAacAAJ&printsec=frontcover&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](http://books.google.com.br/books?id=ek1NAAAacAAJ&printsec=frontcover&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false).
- [5] S.L.B. Boss e J.J. Caluzi, Revista Brasileira de Ensino de Física **29**, 635 (2007).
- [6] J.L. Heilbron, *Electricity in the 17<sup>th</sup> and 18<sup>th</sup> Centuries: A Study of Early Modern Physics* (University of California Press, Berkeley/ Los Angeles/ London, 1979).
- [7] C.C. Silva, in: *Brazilian Studies in Philosophy and History of Science: an Account of Recent Works*, edited by D. Krause and A. Videira (Dordrecht, Springer, 2011), p. 131-140.
- [8] W.T. Jardim e A. Guerra, Caderno Brasileiro de Ensino de Física **34**, 774 (2017).
- [9] C.C. Silva, P. Heering, History of Science **56**, 314 (2018).
- [10] W. Larden, *Electricity for Public Schools and Colleges* (New York/Bombai, Longmans, Green and Co., 1903).
- [11] I.B. Cohen, *Benjamin Franklin's Experiments* (Harvard University Press, Cambridge, 1941).
- [12] B. Franklin, *Experiments and Observations on Electricity, Made at Philadelphia in America* (David Henry, London, 1769).
- [13] L. Figuier, *Les Grandes Inventions Anciennes et Modernes dans les Sciences, l'Industrie et les Arts* (L. Hachette, Paris, 1870).
- [14] I.B. Cohen, *Franklin and Newton: an Inquiry into Speculative Newtonian Experimental Science and Franklin's Work in Electricity* (The American Philosophical Society, Philadelphia, 1956).
- [15] I.B. Cohen, in: *Dicionário de Biografias Científicas, v. 1*, editado por C. Benjamin (Contraponto, Rio de Janeiro, 2007).
- [16] B.A. Moura e T. Bonfim, Caderno Brasileiro de Ensino de Física **34**, 460 (2017).
- [17] I.B. Cohen, *Benjamin Franklin's Science* (Harvard University Press, Cambridge, 1990).
- [18] B. Franklin, *The Autobiography of Benjamin Franklin* (Dover Publications, Mineola/New York, 1996).
- [19] J. Priestley, *The History and Present State of Electricity, With Original Experiments* (Cadell, London, 1767).

### Notas

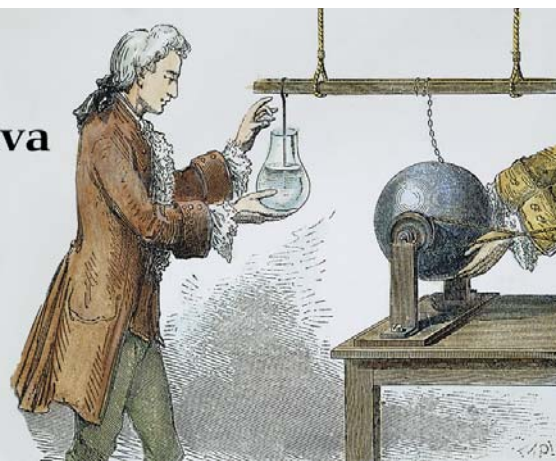
<sup>1</sup>O leitor certamente perceberá esse fato ao ver as referências bibliográficas utilizadas neste artigo, quase todas em inglês.

<sup>2</sup>Os dois artigos aqui referenciados trazem novas e interessantes interpretações sobre a invenção da garrafa de Leiden. O texto em inglês, de C.C. Silva e P. Heering, traz, particularmente, uma reinterpretação historiográfica sobre a invenção, apresentando uma versão diferente da geralmente encontrada em livros e artigos sobre o assunto.

<sup>3</sup>Leiden era a cidade de Musschenbroek.

<sup>4</sup>Essa, na realidade, foi a primeira parte da primeira edição. Outras duas partes foram publicadas em 1753 e 1754, complementando o texto de 1751. Juntas, elas formam o que é conhecida como a primeira edição do livro de Franklin. A publicação em partes de seu texto também foi feita na segunda (1754, em dois momentos diferentes) e na terceira edições (1760 e 1765). A quarta e a quinta edição foram publicadas como um texto único. Ver Ref. [11].

# A Garrafa de Leiden em uma perspectiva histórica da ciência: Replicando experimentos históricos e suas alternativas com material de baixo custo



.....  
**Wagner Tadeu Jardim**

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sudeste de Minas Gerais, Campus Juiz de Fora, MG, Brasil  
E-mail: wagner.jardim@ifsudestemg.edu.br

.....  
**Andreia Guerra**

Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, RJ, Brasil  
E-mail: andreia.guerra96@gmail.com  
.....

## Introdução

**A**tividade experimental recebe muito destaque, tanto nos estudos de história da ciência [1] quanto no ensino das ciências [2]. Apesar da tamanha importância atribuída aos experimentos, em geral eles são referidos nas salas de aula apenas como forma de respaldar ou refutar determinada teoria, sendo a atenção sobre eles voltada apenas aos procedimentos práticos diretamente relacionados em sua execução [3]. Essas questões nos remetem à educação científica e aos trabalhos que defendem ser fundamental trazer à educação básica discussões sobre as ciências [3, 4].

A partir dessas considerações, apresentaremos uma proposta que alia a prática experimental a elementos de história das ciências, para se discutir o panorama que envolve a construção da garrafa de Leiden, aparato conhecido como o primeiro capacitor elétrico. Assim, consideramos o recorte histórico da Europa em meados do século XVIII, no qual eram desenvolvidos estudos da eletricidade. Ao tratarmos de assuntos relativos aos estudos de eletricidade, estamos discutindo um tema de grande destaque nos currículos de cursos de física do ensino básico, em livros didáticos e em atividades experimentais didáticas [5-7], reforçando a relevância do presente trabalho.

O estudo histórico em torno da construção da garrafa de Leiden nos permitiu, em duas turmas da terceira série do ensino médio de uma escola pública, abordar a estrutura dos capacitores, bem como iniciar discussões acerca do que seria um caminho fechado que a eletricidade pode

percorrer, ou seja, o circuito elétrico. Com vistas a apresentar os caminhos seguidos nesse trabalho, dividimos o presente artigo em quatro seções. Na primeira, apresentamos o início do curso, no qual trabalhamos questões históricas fundamentais para entender o contexto em que o artefato garrafa de Leiden foi construído. Na segunda seção, discutimos o desenvolvimento da proposta em sala, quando o

artefato propriamente dito foi trabalhado. Na terceira seção, discutimos os caminhos seguidos em sala de aula para trabalhar, a partir da garrafa de Leiden, o conceito de circuito elétrico e na quarta seção apresentamos cami-

nhos para reprodução de uma garrafa de Leiden com materiais de baixo custo.

## Considerações em torno do contexto histórico-cultural da construção da garrafa de Leiden: experimentação, palestras itinerantes, aulas particulares e a Regra de Dufay

O aparato conhecido como a garrafa de Leiden foi construído pela primeira vez em meados do século XVIII na Europa, em um contexto no qual o tema eletricidade tinha muito espaço nas agendas dos pesquisadores, nos livros, nas demonstrações realizadas ao público. Essas demonstrações constituíam-se em espaços de entretenimento, mas também de produção de conhecimento científico. Naquele contexto, a eletricidade tinha destaque em muitas frentes, inclusive na medicina. Entender a importância da garrafa de Leiden e as questões históricas envolvidas em sua construção implica compreender aspectos da dinâmica científica do século XVIII.

**O aparato conhecido como a garrafa de Leiden foi construído pela primeira vez em meados do século XVIII na Europa, em um contexto no qual o tema eletricidade tinha muito espaço nas agendas dos pesquisadores, nos livros, nas demonstrações realizadas ao público**

O trabalho experimental no ensino de física aliado às discussões sobre o contexto cultural do qual a ciência faz parte mostra-se relevante para suscitar discussões sobre os processos de construção do conhecimento científico. A partir dessas considerações, desenvolvemos uma proposta que consistiu na reprodução de experimentos históricos de física. Apresentaremos, aqui, discussões traçadas no ambiente da sala de aula em relação ao panorama que permeia a construção da garrafa de Leiden, conhecida como o primeiro capacitor elétrico. Nessa perspectiva, elementos histórico-culturais e conceitos físicos foram elencados em aulas de física da terceira série do Ensino Médio. O caminho seguido nos permitiu abordar assuntos como a estrutura básica de um capacitor, seu carregamento e o conceito de circuito elétrico.

Assim, em sala de aula, discutimos com os estudantes que os primeiros estudos da condução elétrica desse período construíram evidências que levaram os filósofos naturais da época a defender a existência do fluido elétrico para explicar o que estaria por trás dos fenômenos relacionados à eletricidade. A concepção dominante era que um fluido carregaria consigo as propriedades de um corpo eletrizado [7,8]. Na discussão histórica, ressaltamos que a eletricidade no século XVIII se desenvolveu a partir da realização de muitos experimentos e da construção de artefatos, sendo o inglês Stephen Gray um personagem de destaque. Em especial, chamamos atenção para o fato de ele ter conduzido muitos experimentos com o filósofo natural e sacerdote Granville Wheler (1701-1770) e destacamos a montagem experimental em que se buscava conduzir o fluido elétrico, a partir de um corpo eletrizado ou de uma máquina eletrostática, através de um corpo humano, com vistas a gerar efeitos elétricos como a atração de pequenos corpos [8]. Reproduzimos uma imagem de 1744 que representa a montagem experimental de Gray (Fig. 1), a partir da qual observamos que o menino suspenso por fios isolantes e posto em contato com um bastão eletrizado atrai pequenos pedaços de papel, efeito da atração eletrostática (Fig. 1).

Ressaltamos com os estudantes que experimentos chamativos como o ilustrado na Fig. 1 não eram incomuns naquele contexto e tomavam lugar nas chamadas palestras itinerantes, nas aulas particulares e mesmo em locais formais de ensino como as universidades. Realizar um experimento cumpria as funções de apresentar e discutir questões científicas e, também, de entreter pessoas, chamando a atenção do grande público para os as-



Figura 2: Representação do anfiteatro de anatomia de Leiden. Museu Boerhaave – Leiden/Holanda. Fonte: Arquivo do autor.

suntos científicos ou despertando interesse para os estudos desenvolvidos à época [9].

Para ilustrar essas questões em sala de aula, apontamos aspectos socioculturais da Holanda naquele contexto e, mais especificamente, relativos à cidade de Leiden. Desde o final do século XVII, a Holanda teve destaque no meio científico, principalmente no que se refere às práticas experimentais. No final do século XVII e início do século XVIII, a Universidade de Leiden e a Universidade de Pádua, na Itália, eram referências nos estudos de anatomia. Para esses estudos, a atenção voltava-se aos anfiteatros de anatomia (Fig. 2). Nesses locais, ocorriam dissecações de cadáveres humanos. Assistiam a essas dissecações um público diverso, ligado à universidade ou não. Ainda no final do século XVII, a Universidade de Leiden adquiriu grande variedade de instrumentos destinados a aulas de química e física, no intuito de tornar o aprendizado dessas disciplinas mais fácil e atrativo, além de

possuir um caráter disciplinador, de treinamento de estudantes [9].

Em sala de aula, destacamos que conhecer sobre as ciências naquele contexto implicava em status social, reconhecimento, sabedoria e, muitas vezes, de proximidade ao divino, que se daria através do desvelar do trabalho de Deus, a partir do conhecimento da natureza. Essas razões, dentre outras, atraíam os olhares para as ciências dos que não tinham acesso ao estudo formal nas universidades. Assim, abriu-se um grande mercado para aulas particulares e demonstrações científicas fora das universidades, e estas, oferecidas aos que podiam arcar com algum custo financeiro, tornaram-se cada vez mais populares. Naquele contexto, as ciências ganhavam espaço em locais variados e alcançavam um público cada vez mais diverso [9].

Para ilustrar o contexto em que se desenvolveram as aulas particulares e o trabalho dos instrumentadores no século XVIII, discutimos o exemplo de Gabriel Fahrenheit, por ser um nome já conhecido dos estudantes. Fahrenheit foi um cientista, engenheiro e soprador de vidro alemão-polonês que viveu por muitos anos na Holanda, construindo equipamentos para serem utilizados em cursos que ele mesmo oferecia fora dos muros das universidades. Ele ministrou cursos de ciências aos menonitas (uma comunidade cristã), dos quais muitos eram comerciantes. Os menonitas possuíam recursos financeiros e interesse pelos estudos sobre a natureza, porém, por questões religiosas, a eles não era permitido o ingresso na Universidade de Leiden.

No intuito de direcionar as discussões para os estudos da eletricidade, destacamos os trabalhos desenvolvidos por Charles François de Cisternay Dufay (1698-

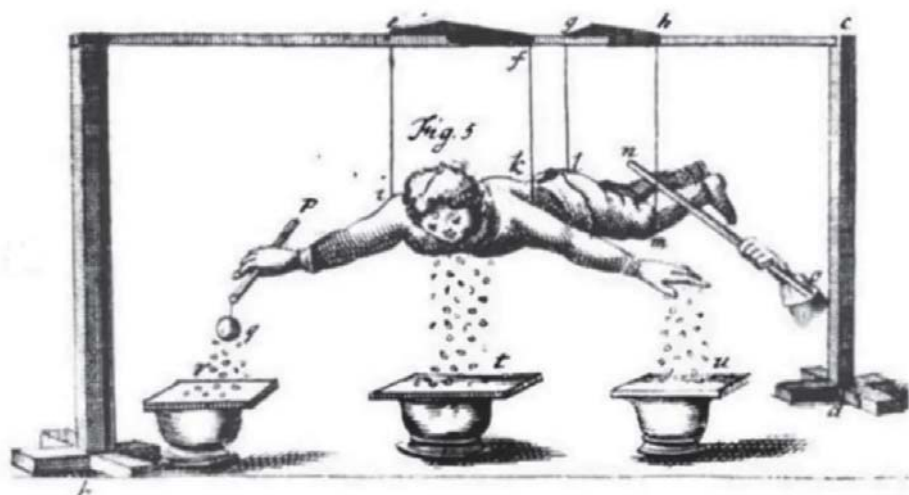


Figura 1: Experimento sobre a eletricidade comunicada através do corpo de um menino suspenso por fios isolantes [8, p. 247].



1739). Dufay ingressou na Academia de Ciências de Paris bem jovem, ainda sem trabalhos científicos publicados, muito por conta da rede de contatos de seu pai, que era um oficial militar influente. Dufay realizou sistematicamente diversos experimentos e observações acerca de fenômenos elétricos e, a partir dos resultados que obteve e daqueles produzidos por outros pesquisadores, concluiu que apesar de alguns materiais apresentarem dificuldade para se eletrizarem, todos os materiais poderiam ser eletrizados, desde que um determinado procedimento fosse adotado [9].

Era possível eletrizar qualquer material desde que o mesmo ficasse sobre uma superfície isolada e espessa (isolada eletricamente, em termos modernos), para que o fluido elétrico que entrasse no corpo não escapasse. Essa conclusão de Dufay era coerente com os resultados experimentais de outros pesquisadores, o que contribuiu para que a mesma fosse amplamente aceita. Apesar disso, é importante salientar que Dufay era então um personagem muito importante, membro de uma das mais importantes academias científicas da época, o que contribuiu para seus trabalhos serem rapidamente difundidos. A aceitação e ampla difusão desse procedimento fez com que o mesmo ganhasse, à época, o status de “regra”, sendo então adotado por todos aqueles que se dedicavam aos estudos da eletricidade.

Além da regra de Dufay, um dos experimentos que se tornaram muito conhecidos à época foi o dos fogos de artifício de Bose. Georg Matthias Bose (1710-1761), professor na Universidade de Wittenberg (Alemanha), propôs em 1737 uma montagem experimental que servia para extrair “fogo elétrico” (faíscas) de recipientes de vidro preenchidos com água. Mais tarde, substituindo a água por líquidos inflamáveis, utilizou efeitos elétricos para gerar a ignição desses líquidos [10]. Experimentos sobre extração de fogo elétrico e ignição, em diferentes configurações, foram desenvolvidos por muitos outros, como pelo escocês Andreas Gordon (1712-1750) [8].

### A garrafa de Leiden e o circuito elétrico com pessoas

A partir das discussões anteriores, retomamos os fenômenos de eletrização, já estudados em aulas anteriores<sup>1</sup>, e ressaltamos que experimentos como os de Bose e Gordon guiaram muitos pesquisa-

dores na tentativa de se armazenar o fluido elétrico, de forma a poder transportá-lo e conservá-lo de maneira eficaz e prática. Dentre estes, Petrus Van Musschenbroek (1692-1761) e Ewald Jürgen Von Kleist (1700-1748) tiveram destaque. O primeiro foi um holandês que, após se formar em medicina na Universidade de Leiden, passou vários anos em Londres, onde teve contato com Newton e seu discípulo Desaguliers. Além disso, Musschenbroek era de uma família muito reconhecida em Leiden pelo trabalho na produção de instrumentos científicos.

O germânico Kleist também se formou na Universidade de Leiden, onde teve muito contato com a prática experimental e instrumentista. De volta à sua terra natal, continuou a trabalhar com experimentos e construção de instrumentos.

Em 1745, Kleist buscou armazenar eletricidade em um recipiente de vidro preenchido com água. Apoiado na Regra de Dufay e em experimentos como o de Bose, isolou eletricamente os arredores do recipiente e ligou o interior do recipiente a uma máquina eletrostática através de um fio condutor, sem sucesso no início. No entanto, em outra tentativa de armazenamento do fluido elétrico, Kleist conse-

guiu observar o efeito de faíscas elétricas ao não isolar o recipiente, por ter segurado o recipiente em suas mãos durante o procedimento de eletrização do interior da garrafa (Fig. 3). As faíscas obtidas por Kleist saltavam do interior do recipiente durante algum tempo, após o mesmo ter sido desconectado da máquina eletrostática. Kleist comunicou essas observações, no final de 1745, a seus correspondentes germânicos, que ficaram bastante impressionados com os resultados [8,9].

Em sala de aula, ao falar sobre o procedimento seguido por Kleist, alguns dos estudantes se mostraram confusos, pois acreditavam que a eletricidade deveria escoar do gerador eletrostático diretamente até o solo. Dessa forma, reconheciam que, ao segurar a garrafa, Kleist fazia com que um corpo eletrizado, ou seja, o recipiente com água, se descarregasse. Assim, antes que pudessemos avançar na discussão histórica e situar Musschenbroek no período tratado, surgiram discussões como as apresentadas a seguir:

A1: Agora eu não entendi, a gente não tinha concordado que pra manter a carga em um corpo ele não poderia ser segurado nas nossas mãos?

A2: Verdade, até resolvemos um exercício disso, tava errado então?

P: O exercício que resolvemos era sobre a dificuldade de eletrizar um corpo

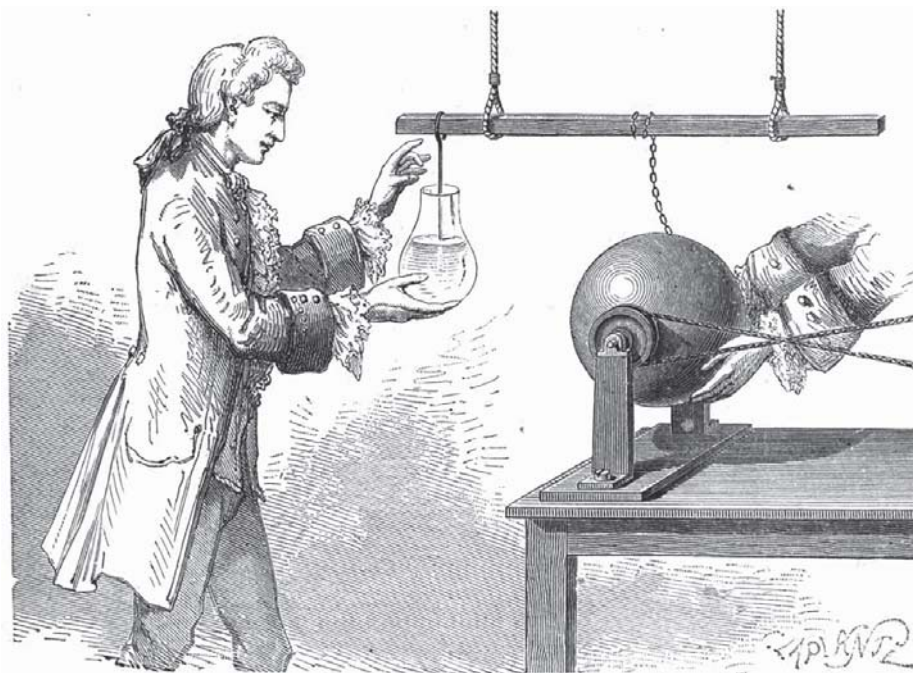


Figura 3: Representação do procedimento seguido por Kleist ao carregar eletricamente o recipiente preenchido com água ([http://physics.kenyon.edu/EarlyApparatus/Static\\_Electricity/Leiden\\_Jar/Leiden\\_Jar.html](http://physics.kenyon.edu/EarlyApparatus/Static_Electricity/Leiden_Jar/Leiden_Jar.html), último acesso em 13/09/2018).

metálico segurado em nossas mãos...

A2: De qualquer forma, a água também é condutora, a eletricidade não tinha que passar direto, da máquina pela água e pela pessoa até o chão?

P: A princípio, sim, se houver um caminho condutor do gerador eletrostático até o chão, esse seria o esperado de se acontecer.

A2: Então, ele não deveria apenas tomar um choque e pronto? Ele, a água, a máquina, tudo deveria ficar neutro.

P: Até aí tudo certo, mas estão se esquecendo de alguma coisa no meio do caminho que modifica essa passagem direta da eletricidade, o vidro.

A3: Ah! Verdade, o vidro é um isolante. Mas ainda não faz muito sentido, se o vidro é um isolante, não devia ter diferença se a garrafa da imagem estivesse isolada ou não, a eletricidade não iria escapar de qualquer jeito.

Com o intuito de retomar a discussão histórica, avisamos aos estudantes que as questões por eles apontadas seriam retomadas em aulas seguintes e que para melhor entendê-las seriam importantes algumas discussões prévias. Assim, começamos a discutir que Musschenbroek, aproximadamente na mesma época que Kleist, mas sem ter conhecimentos dos trabalhos do germânico, realizou com Jean Nicolas Sébastien Allamand (1713-1787), na Universidade de Leiden, montagens experimentais com o intuito de armazenar fluido elétrico, mas também sem muito sucesso a princípio. Andreas Cuneaus, um advogado que frequentava o laboratório de Musschenbroek, interessou-se muito pelos experimentos destinados ao armazenamento do fluido elétrico. Nesse momento, lembramos aos estudantes que esse interesse pelas ciências, bem como possuir instrumentos científicos, era algo comum a pessoas com poder aquisitivo e sem formação nas áreas científicas. Cuneaus tentou reproduzir os procedimentos experimentais que conheceu com Musschenbroek por conta própria. Porém, não sendo um estudioso da eletricidade, não seguiu exatamente os procedimentos de Musschenbroek. Assim, Cuneaus, ao conectar o interior de um jarro com água à máquina eletrostática, segurou o recipiente nas mãos, conseguindo resultados semelhantes ao de Kleist [8].

Cuneaus rapidamente comunicou o ocorrido para Allamand e Musschenbroek, que repetiram o experimento tal

como Cuneaus descrevera, obtendo o desejado armazenamento da eletricidade. Eles reportaram o ocorrido, no início de 1746, em uma carta para René Antoine Ferchault de Réaumur (1757-1783), que era um membro de destaque da Academia de Ciências de Paris.

Para retomar e discutir as dúvidas sobre o procedimento de carregamento da garrafa de Leiden, apresentamos o caminho que as cargas fariam, da máquina eletrostática até a terra, caso o vidro não fosse um isolante elétrico (Fig. 4).

Ressaltamos que existiram dificuldades na reprodução desse experimento e que as condições para um sucesso em sua reprodução passaram a ser amplamente exploradas e discutidas entre os interessados nos estudos da eletricidade. Para dar continuidade às aulas, apresentamos então as estruturas das garrafas de Leiden. Exemplificamos essas garrafas primeiro a partir da estrutura de um capacitor de placas paralelas. Ao contextualizar a garrafa como um capacitor, relacionamos o aparato aos capacitores modernos e explicamos suas estruturas sempre as relacionando à Garrafa de Leiden (Fig. 5).

Discutimos que, à medida que as cargas elétricas negativas encontram uma das placas condutoras do capacitor (ou o condutor interno à garrafa), elas ficam ali contidas e, através de uma indução mediada pelo campo elétrico através do vidro, as cargas negativas na outra placa condutora (condutor externo à garrafa) deslocam-se pelo caminho existente. Assim, o material isolante entre as placas é indispensável para que as cargas não sejam conduzidas diretamente à terra, da maneira que era esperada pelos alunos para o caso de uma pessoa segurando a garrafa de Leiden durante seu carregamento. Isso

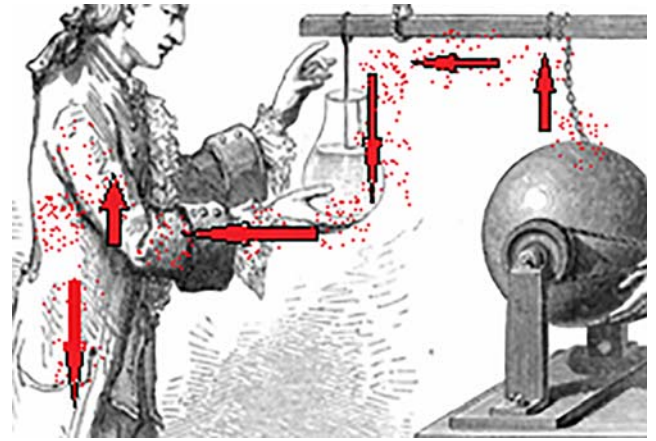


Figura 4: Representação utilizada para inserir as discussões sobre o carregamento de um capacitor. Caminho do fluido elétrico a partir da máquina eletrostática, passando por condutores, pela água e pela pessoa até a terra.

**Armazenar eletricidade no século XVIII, através de uma garrafa de Leiden, abriu portas ao desenvolvimento de novas técnicas e pesquisas sobre eletricidade e áreas relacionadas**

porque esse material permite a construção de uma configuração de polarização de cargas, ou seja, uma superfície condutora com cargas de um sinal e outra superfície condutora, do outro lado do isolante, com cargas de sinal oposto.

Além disso, destacamos que um dos fatores que influenciam a quantidade de cargas armazenadas em um capacitor relaciona-se ao espaço disponível para elas,

ou seja, a área das superfícies condutoras de um capacitor. Quanto maior sua área, maior é sua capacidade de armazenar cargas. Indicamos, também, que a distância entre as placas condutoras e o material isolante que os separa exerce influência. No caso da garrafa de Leiden, o material é o vidro e a distância entre as placas condutoras refere-se à espessura do vidro. Assim, para o caso das garrafas de Leiden, quanto maior a área do recipiente (e seu revestimento) e menor a espessura do recipiente, maiores serão os efeitos elétricos.

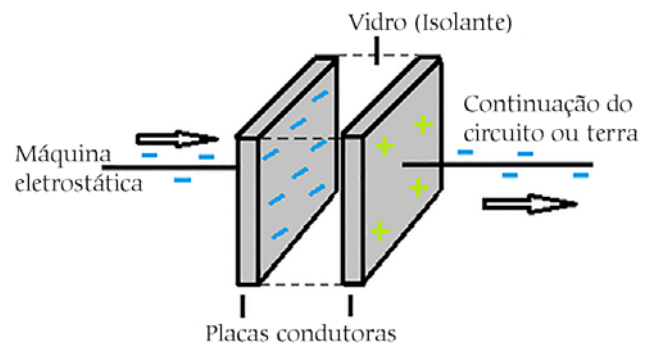


Figura 5: Representação do carregamento de uma garrafa de Leiden/capacitor de placas paralelas.





Figura 6: Do lado esquerdo, uma garrafa replicada de acordo com o método da replicação [2]; à direita, os componentes de uma garrafa de Leiden didática desmontável.

tricos percebidos:

$$C = \frac{\epsilon \cdot A}{d}$$

Para um capacitor de placas paralelas,  $C$  é o que chamamos de capacitância,  $\epsilon$  é a permissividade do meio isolante, que possui relação com seu material.  $A$  é a área de cada superfície condutora (armaduras) e  $d$  é a distância entre as superfícies condutoras.

Para reforçar os conceitos físicos discutidos e sua relação com a estrutura de uma garrafa de Leiden, disponibilizamos aos estudantes algumas garrafas de Leiden para que pudessem manipulá-las.

Dentre essas garrafas encontravam-se réplicas, construídas de maneira a se aproximarem das versões produzidas no século XVIII, seguindo o método da replicação<sup>2</sup>, e versões didáticas que, por serem desmontáveis, permitiam uma fácil visualização da estrutura interna de uma garrafa de Leiden (Fig. 6).

Assim, enquanto os estudantes manipulavam as garrafas fornecidas, posicionamos as máquinas eletrostáticas disponíveis (gerador de Van der Graff e uma máquina de Winshurst) de modo a ficarem visíveis para todos os estudantes. Repetimos, então, o procedimento de segurar a garrafa na mão enquanto o gerador eletrostático a carregava. Enquanto carregávamos uma garrafa de Leiden, surgiram questionamentos sobre esse processo:

A:4 Na hora de descarregar a garrafa, a gente toma choque, mas enquanto estamos segurando, na hora de carregar na máquina [eletrostática], por que a gente não toma choque?

P: O processo de carregamento leva um tempo, então a quantidade de cargas que vai passando por nós enquanto isso não é tão grande de uma vez só, quer dizer, vai aos poucos enquanto na hora de descarregar vem de uma vez só, por isso sentimos esse choque.

A4: Mas o capacitor pode ser utilizado no lugar de uma pilha no caso?

P: A pilha e o capacitor têm funções diferentes em um circuito. Por exemplo, podemos pensar em uma máquina fotográfica ou celular, que funciona com uma pilha ou bateria. Essa pilha vai fornecendo energia elétrica aos poucos, e de forma contínua, para manter o funcionamento do aparelho e também carregar o capacitor. O capacitor demora um tempinho para se carregar, mas ele consegue liberar essa eletricidade armazenada muito mais rápido, o que na nossa câmera poderia ser responsável pelo flash de luz, que exige uma quantidade maior de energia em um tempo curto. Iremos discutir melhor sobre a pilha nas próximas aulas.

Enfatizamos que a garrafa de Leiden suscitou questões acerca dos estudos da época sobre eletricidade, mas que o conhecimento estabelecido sobre o tema, como a Regra de Dufay, não foi abandonado naquele contexto, tampouco o fato de os conhecimentos da época não

explicarem o funcionamento da garrafa de maneira análoga ao que conhecemos

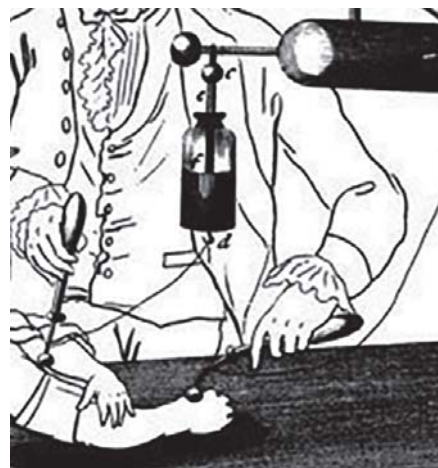


Figura 7: Tratamento medicinal ministrado com descargas elétricas, a partir de garrafas de Leiden, aplicadas a membros paralisados (<http://washuu.net/MedLec/Return.htm>, último acesso em 13/09/2018).

hoje impediu sua ampla utilização e divulgação. A garrafa de Leiden popularizou-se em usos medicinais, como nos tratamentos de paralisias musculares [11] (Fig. 7), e em demonstrações de fenômenos elétricos voltadas ao entretenimento e à pesquisa.

### A garrafa de Leiden e o circuito elétrico

A garrafa de Leiden popularizou-se e impulsionou novos estudos no período por ser capaz de armazenar quantidades razoáveis de eletricidade e por ser facilmente manipulada e transportada [9, 10]. Essa popularização impulsionou a realização de diversos estudos sobre a estrutura do aparato, a necessidade de manter a superfície externa da garrafa completamente seca, o impacto da utilização de diferentes tipos de vidro, a temperatura da água a ser utilizada, dentre outros. Um dos aspectos que podemos destacar como de grande relevância naquele contexto é que a garrafa de Leiden contribuiu muito para a construção e o desenvolvimento da ideia de circuito elétrico [12].

Em geral, defendia-se que quando um bastão de vidro era atritado a outro material para ser eletrizado ou uma máquina eletrostática era colocada em funcionamento, a eletricidade gerada deveria ser transferida para outro corpo próximo. Observações relativas ao fato de que uma pessoa, ao tocar com uma das mãos o condutor que reveste externamente a garrafa e com a outra o condutor ligado à

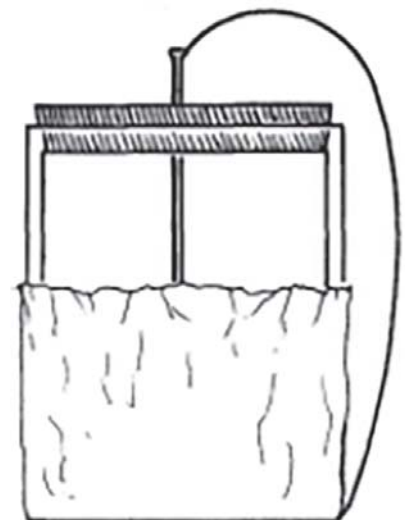


Figura 8: Uma garrafa de Leiden com seu circuito fechado por um fio que conecta a superfície externa ao condutor (prego), que se conecta à parte interna. Após carregar o aparato, fechar o circuito permite a percepção de uma descarga elétrica [14, p. 27].



parte interna da garrafa (Fig. 8), descarrega o aparato, deu suporte à concepção do caminho (circuito) seguido pela eletricidade [10].

A partir dessas considerações e para explorar a ideia de circuito elétrico, apresentamos demonstrações realizadas por diversos pesquisadores da época, dentre os quais Jean-Antoine Nollet (1700-1770), um dos mais proeminentes eletricitistas do período, que formou um circuito com 180 componentes da guarda francesa e uma garrafa de Leiden (Fig. 9) [8]. Aqui, relacionamos experimentos demonstrativos como esses com a cultura científica experimental daquele contexto, que envolvia esses espetáculos voltados ao público.

Convidamos, então, os estudantes interessados a reproduzir um experimento similar àquele de Nollet, deixando claro que ninguém seria obrigado a participar. Em uma turma com 26 alunos, 21 participaram (Fig. 10 e Fig. 11).

Para carregar a garrafa, realizamos várias tentativas, nas quais aumentávamos gradativamente, em cada uma delas, a quantidade de eletricidade fornecida pela máquina eletrostática (máquina de Wimshurst). Julgamos esse procedimento importante pois não queríamos correr o risco de uma descarga muito intensa a princípio, o que poderia assustar, causar algum desconforto ou mesmo ferir alguém.

Os estudantes mostraram-se muito entusiasmados com o experimento, que foi reproduzido diversas vezes, a pedido deles. Para melhor explorar a concepção do circuito elétrico, pedimos para que os que não participaram do circuito até então se conectassem a um dos alunos componentes do circuito, com apenas uma das mãos. Com isso exemplificamos que mesmo em contato com o circuito o estudante, nessa situação, não sentiu os efeitos elétricos, pois não participava dos caminhos possíveis para a eletricidade (Fig. 12).

### **Construindo uma garrafa de Leiden dissecável de baixo custo**

Como descrito ao longo do texto, para carregar as garrafas de Leiden utilizamos máquinas eletrostáticas, como o gerador de Van der Graff da escola e uma máquina de Wimshurst que o professor possuía. Sobre as garrafas de Leiden, utilizamos réplicas que produzimos a partir do método da replicação desenvolvido na Universidade de Flensburg (Alemanha), que tem como objetivo a reprodução dos experimentos de maneira a se aproximar tanto quanto possível dos experimentos históricos originais [2]. Utilizamos também



Figura 9: Experimento de Nollet utilizando uma garrafa de Leiden e soldados para formar um circuito elétrico (<https://www.sciencesource.com/archive/Winckler-s-Leyden-Jar-1746-SS2776177.html>, último acesso em 13/09/2018).



Figura 10: Replicação do experimento de circuito elétrico formado por pessoas e uma garrafa de Leiden, como apresentado no slide (Fig. 9) ao fundo.



Figura 11: Momento da descarga elétrica a partir da garrafa de Leiden.



Figura 12: Representação de um circuito elétrico formado por pessoas e uma garrafa de Leiden; a pessoa que está por fora do circuito, apesar de estar em contato, não participa do caminho de passagem da corrente elétrica.

garrafas de Leiden didáticas, adquiridas através de um site Xump, que foram de grande auxílio para discutirmos a estrutura dos capacitores.

Como entendemos que nem sempre é possível adquirir esses equipamentos, descreveremos brevemente a construção de uma garrafa de Leiden alternativa, bem como meios de se carregar o aparato que não dependam dos aparatos citados. Encontramos diversas propostas de replicação da garrafa de Leiden de baixo custo na internet, como no Youtube, e em livros [7, 13, 14]. No entanto, ao tentar reproduzir algumas delas e construir outras configurações, não conseguimos obter descargas que fossem sensíveis pelo ser humano, efeito necessário para reproduzir o circuito elétrico com pessoas. Assim, procuramos uma nova reprodução que se apresentou satisfatória para nossos propósitos de demonstração.

Como materiais, utilizamos:

- 2 embalagens metálicas descartáveis de “marmitex” grandes<sup>3</sup> (revestimentos condutores interno e externo à garrafa);
- um copo de acrílico (isolante, que cumpre o papel do recipiente de vidro);
- um pedaço de isopor (obtido em bandejas de alimentos comprados



Figura 14: Componentes da garrafa de Leiden desmontável de baixo custo.

- na padaria);
- um prego grande;
- um pedaço pequeno de papel alumínio.

Para construir o aparato, posicionamos o copo de acrílico no centro do revestimento metálico e com as mãos fomos moldando a folha metálica ao formato externo do copo. Repetimos o procedimento para a outra folha metálica. Note que não precisamos cortar o material, apenas ajustamos ao formato do copo dobrando e amassando as folhas metálicas (Fig. 13).

Recortamos um pedaço de isopor um pouco maior do que a largura da boca do copo. Esse isopor serviu como tampa da garrafa e suporte para fixar o condutor (prego) que liga a parte interna de nossa garrafa de Leiden à parte externa. Para finalizar o contato entre o prego e o revestimento interno, conectamos ambos através de um pedaço de papel alumínio (Fig. 14).

Existem diferentes formas de carregar uma garrafa de Leiden, como atritar um tubo de PVC a uma folha de jornal e passar o tubo no fio condutor (prego) da garrafa de Leiden, repetindo esse processo diversas vezes. É possível, também, utilizar um televisor antigo (de tubo), passando o fio condutor em sua tela seguidas vezes enquanto se liga e desliga o aparelho. Todavia, nos testes que realizamos, apesar de conseguirmos perceber os efeitos de atração elétrica por estar o aparato carregado eletricamente, e mesmo, algumas vezes, obter uma pequena faísca elétrica, os efeitos se mostraram pouco intensos, capazes apenas de mostrar efeitos de atração eletrostáticos ou a descarga realizada na própria garrafa (Fig. 13), mas insuficientes para o



Figura 13: Moldando o revestimento metálico (embalagem de “quentinha”) da garrafa de Leiden.

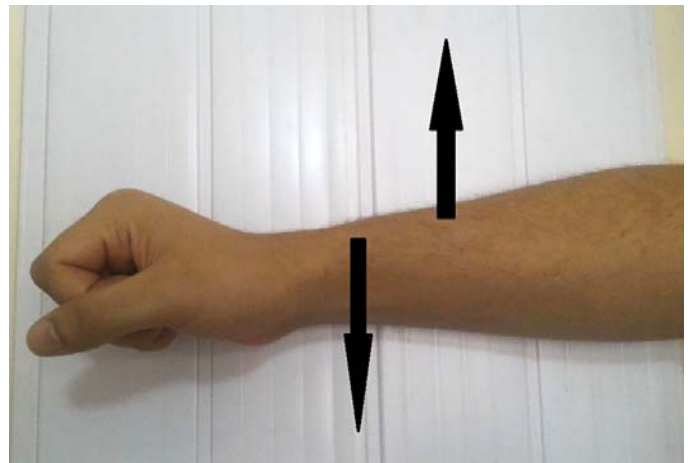


Figura 15: Eletrizando a placa de PVC a partir do atrito entre ela e a pele.

experimento do circuito elétrico com pessoas.

Além de carregar as garrafas com as máquinas eletrostáticas disponíveis, uma alternativa que gerou os efeitos desejáveis se deu a partir de uma placa de PVC eletrizada por atrito. Tentamos o procedimento esfregando materiais como lã e jornal na placa de PVC, mas o efeito gerado foi pouco intenso. Dentre as tentativas realizadas, o melhor efeito observável se deu a partir do atrito entre a pele seca e a placa de PVC (Fig. 15).

Em seguida, passamos a extremidade do condutor da garrafa de Leiden pela placa que ia se carregando; era possível escutar pequenos estalos no processo (Fig. 16). Esse procedimento foi repedido algumas vezes antes da descarga da garrafa. Ressaltamos que realizamos o procedimento em diferentes dias, em situações climáticas diversas. Dependendo das condições climáticas, faíscas mais intensas só eram geradas em ambientes resfriados com ar condicionado, uma vez que o ar condicionado acarreta uma menor umidade no ambiente.

Ressaltamos que uma opção de consulta sobre questões relacionadas ao processo de construção de uma garrafa de





Figura 16: Processo de carregamento da garrafa de Leiden em uma placa de PVC eletrizada.

Leiden com materiais acessíveis, bem como as limitações e vantagens de distintos materiais modernos que podem empregados e métodos para o carregamento do aparato, é um livro que se encontra disponível gratuitamente na internet [7].

### Comentários finais

Discutir os aspectos históricos relacionados ao episódio da construção da

garrafa de Leiden nos permitiu levar para a sala de aula de física do Ensino Médio discussões acerca do processo de construção das ciências.

Além disso, a reprodução dos experimentos históricos e a discussão em torno aos estudos produzidos no contexto histórico da construção do aparato possibilitaram a problematização do conceito de circuito elétrico e do papel do capacitor

elétrico em um circuito simples, relacionando sua estrutura a conceitos físicos já trabalhados em sala. Nesse sentido, reforçamos novas questões trazidas pelo advento da garrafa de Leiden, possibilitando o destaque do caráter dinâmico e contextual do conhecimento científico.

Consideramos que a proposta culminou em um bom retorno pedagógico, pois, além das discussões geradas, os estudantes mostraram-se muito interessados durante as aulas em que a abordagem foi desenvolvida.

### Agradecimento

Agradecemos à CAPES e ao CNPq pelo apoio disponibilizado durante o desenvolvimento da pesquisa e ao prof. dr. Peter Heering da Universidade de Flensburg pela orientação sobre os trabalhos de replicação dos experimentos históricos.

### Referências

- [1] P. Galison. *How Experiments End* (University of Chicago Press, Chicago, 1987), 1ª ed.
- [2] P. Heering and D. Höttecke, in: *International Handbook of Research in History, Philosophy and Science*, editado por M. Mathews (Springer Netherlands, Nova York, 2014).
- [3] W.T. Jardim e A. Guerra, *Investigações em Ensino de Ciências* **22**, 3, (2017).
- [4] A. Martins, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **32**, 3, (2015).
- [5] C.C. Silva e A.C. Pimentel. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **25**, 141, (2008).
- [6] M.P.D Souza Filho, S.L.B. Boss, J.J. Caluzi e J. Mianutti, *A Física na Escola* **12**, 1 (2011).
- [7] A.K.T. Assis, *Os Fundamentos Experimentais e Históricos da Eletricidade*, vol. 2 (Apeiron, Montreal, 2018), 1ª ed, disponível em <https://www.ifi.unicamp.br/~assis/Eletricidade-Vol-2.pdf> último acesso em 13/09/2018.
- [8] J.L. Heilbron, *Electricity in the 17th and 18th Centuries: a Study of Early Modern Physics* (Univ. of California Press, San Diego, 1979).
- [9] W.T. Jardim e A. Guerra, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **34**, 3, 774 (2017).
- [10] P. Benjamin, *A History of Electricity: (The Intellectual Rise in Electricity) from Antiquity to the Days of Benjamin Franklin* (J. Wiley & Sons, New York, 1895).
- [11] W.T. Jardim e A. Guerra, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **40**, 3 (2018).
- [12] C.C. Silva and P. Heering. *History of Science* **56**, 1 (2018).
- [13] G. Leon, *The Story of Electricity – With 20-Easy-To-Perform Experiments* (Dover Publications, Nova York, 1983).
- [14] A. Guerra, M. Braga e J.C. REIS, *Faraday e Maxwell, Eletromagnetismo da Indução aos Dínamos* (Atual Editora, São Paulo, 2004).

### Endereços de Internet

Xump: <https://www.xump.com/> último acesso em 13/9/2018,

Youtube: Exemplo de garrafa de Leiden de baixo custo <https://www.youtube.com/watch?v=Lxe4FAI-g6s>, último acesso em 13/9/2018,

### Notas

- <sup>1</sup> Os fenômenos de eletrização estudados sempre vinham com um paralelo entre as concepções daquele período histórico e a concepção moderna (não contemporânea) da matéria, discutindo as limitações de cada qual.
- <sup>2</sup> Na reconstrução dos aparatos, o grupo de Oldenburg preza por resgatar, tanto quanto possível, os materiais que eram empregados originalmente. O processo de replicação permite extrapolar os escritos dos cientistas como fonte de estudo. Isso porque com a reprodução do experimento é possível investigar as técnicas empregadas na fabricação dos mesmos, as dificuldades oriundas do desenvolvimento do experimento e outras questões próprias da construção do experimento que não necessariamente seriam percebidas a partir dos escritos dos cientistas [2].
- <sup>3</sup> Escolhemos esse material em vez do papel alumínio pois, por ser mais rígido, o molde feito com esse material não precisa ser colado ao copo, de modo que esses componentes podem ser facilmente separados uns dos outros.





aumento e pela diminuição, respectivamente, da concentração de moléculas de ar que se deslocam em movimento oscilatório, acompanhando as oscilações do prato, e correspondem a variações da densidade e da pressão, as quais são relevantes porque os gases são muito compressíveis. Essa alta compressibilidade é oriunda do baixo potencial de interação entre suas moléculas.

Quando o prato oscila, sua camada superficial de metal transfere quantidade de movimento e energia para a primeira camada de ar subjacente de ar, a qual, por sua vez, colidindo com a subsequente, dá continuidade ao processo de propagação de momento e energia. Feynman, Leighton e Sands [8] e Nussenzweig [9] sintetizam da seguinte maneira o mecanismo de propagação de uma onda sonora:

1. O deslocamento de moléculas do ar altera a densidade de equilíbrio do ar;
2. A mudança de densidade corresponde a uma variação da pressão em relação à pressão de equilíbrio;
3. As diferenças de pressão implicam novos deslocamentos do gás.

E assim sucessivamente.

Matematicamente, tem-se três grandezas que descrevem o problema. Primeiro, o deslocamento  $\mathcal{X}$ , que não é o movimento de uma ou outra molécula, mas do centro de massa de um pequeno (tão pequeno quanto se queira) volume de gás (um cilindro infinitesimal) que oscila em torno de uma dada posição de equilíbrio. As outras duas grandezas são a pressão e a densidade do referido elemento de volume do ar, designadas neste trabalho, respectivamente, por  $p$  e  $\rho$ . Logo, podem ser



Figura 1: Representação de um prato de bateria quando é tocado. Seu movimento vibratório faz com que o ar circundante também passe a vibrar, criando camadas de compressão e rarefação ao seu redor.

deduzidas três equações de onda para o problema da propagação do som: uma para a onda de deslocamento, outra para a onda de pressão e outra para a onda de densidade.<sup>2</sup> Suas soluções são funções harmônicas nas coordenadas espacial  $x$  e temporal  $t$ , tal que o comprimento de onda  $\lambda$  e o período  $P$  da onda, que é o inverso de sua frequência  $f$ , expressam, respectivamente, suas periodicidades espacial e temporal. Todas essas três ondas se propagam com a mesma

velocidade  $v$ .

Particularmente, as ondas de deslocamento terão a forma:

$$\mathcal{X} = \mathcal{X}_0 \cos(kx \pm \omega t), \quad (1)$$

onde  $\mathcal{X}_0$  é a amplitude da onda de deslocamento,  $k$  é o número de onda, dado por  $k = 2\pi/\lambda$ , e  $\omega$  é a frequência angular da onda, dada por  $\omega = 2\pi/P = 2\pi f$ . Elas assemelham-se à imagem de ondas sobre uma superfície de um lago, onde percebemos o movimento harmônico da matéria fixando-se a coordenada de equilíbrio do centro de massa de um dado volume extremamente pequeno de gás. Grosso modo, quando fixamos nosso olhar em uma folha, ou seja, quando escolhemos uma coordenada  $x \equiv x_1$ , estamos acompanhando o seu movimento oscilatório sobre a superfície da água na qual uma pedra fora atirada (em suas proximidades).

A seguir, discutimos alguns aspectos da nossa percepção do som,<sup>3</sup> trazendo conceitos importantes para nossa proposta didática. Na sequência, analisamos algumas equações da acústica, que serão fundamentais para as estimativas dese-

jadas.

## Percebendo o som

O nosso ouvido possui algumas características interessantes. Uma delas é que existe uma intensidade mínima, ou limiar de audibilidade,  $I_0$ , abaixo da qual o som não é audível. E há outra máxima, ou limiar de dor,  $I_m$ , acima da qual o som produz uma sensação de dor ou desconforto. Considerando  $f = 1000$  Hz como valor de referência, tem-se que  $I_0 = 10^{-12}$  Wm<sup>-2</sup> e  $I_m = 1$  Wm<sup>-2</sup> [9-11]. Como podemos perceber, os valores de intensidade variam em muitas ordens de grandeza e, na prática, em acústica, trabalha-se com o nível de intensidade sonora  $\alpha$  em vez da intensidade sonora  $I$ . O nível de intensidade sonora é expresso em decibéis (dB) e é obtido pela seguinte expressão:

$$\alpha = 10 \log_{10}(I/I_0) = 10 \log_{10}(I/10^{-12}). \quad (2)$$

Outra característica é que nosso ouvido “funciona” de forma logarítmica. Isso fica claro com a análise das curvas de igual audibilidade (veja a Fig. 2), construídas originalmente por Fletcher e Munson [11]. O nível de audibilidade é a grandeza que quantifica a audibilidade (sensação) e sua unidade é o fon. O valor de um fon é igual ao nível de intensidade sonora, em dB, da frequência de referência de 1000 Hz. Assim, as curvas de igual audibilidade representam os níveis de audibilidade obtidos pelo ajuste do nível de intensidade do som de referência até que ele soe com o mesmo volume segundo o julgamento de um típico ouvinte, isto é, aquele que tenha audição normal para tais testes, tal que ele apresente os resultados coerentes com a média obtida a partir de um número maior de tais ouvintes.

A região no canto inferior esquerdo da Fig. 2 abaixo da curva de 0 fon retrata nossa pouca sensibilidade para as frequências mais graves, isto é, de menor frequência, para as quais os níveis de intensidade correspondentes estão bastante acima dos níveis das frequências compreendidas entre 1000 Hz e 5000 Hz, ditas médio agudas. Analisando ainda a curva de 0 fon, vemos que uma nota musical a 90 Hz é perceptível pelo ouvido humano a partir de 40 dB, enquanto que para 1000 Hz precisamos somente de 0 dB. Em suma, cada frequência é percebida de maneira diferente pelo ouvido: frequências diferentes precisam de intensidades diferentes para que nos soem igualmente perceptíveis.

Ressaltamos também que os valores negativos dos níveis de intensidade da curva de 0 fon entre 1000 Hz e 5000 Hz não representam problemas físicos, já que o

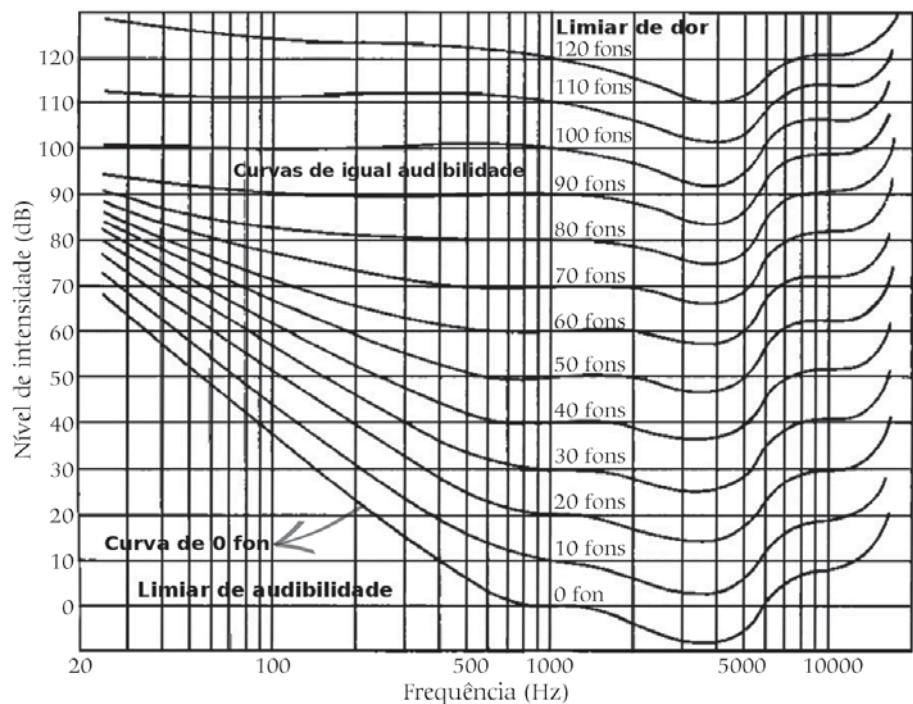


Figura 2: Gráfico em escala logarítmica das curvas de igual audibilidade, adaptado da Ref. [11].

argumento do logaritmo, dado pela razão de intensidades, sempre será positivo. Outra observação refere-se ao fato de que o nível de intensidade de um som cuja intensidade seja dobrada, será 3 dB maior.<sup>4</sup> Assim, para que seja audível, um som a 90 Hz deve ter uma intensidade cerca de 13 vezes maior do que um a 1000 Hz.

Ademais, lembrando que nosso ouvido é altamente não linear e responde mal às frequências mais graves e muito agudas, tipicamente acima de 10000 Hz, como mostra a Fig. 2, fica o seguinte questionamento: por que ouvimos um som equalizado durante shows musicais, isto é, um som equilibrado de graves, médios e agudos?

Além da afinação dos instrumentos pelos músicos, os técnicos e engenheiros de som praticam o que no meio musical é chamado de alinhamento de som: um ajuste do sistema de sonorização, feito antes de cada show, que leva em conta a acústica do local, dentre outros fatores. Com o alinhamento, então, corrigem-se deficiências acústicas (por exemplo, o local pode otimizar demasiadamente certas frequências e atenuar outras), tal que se pode compensar, inclusive, as limitações auditivas humanas para os sons mais graves e muito agudos. Dito de outra maneira, com equipamentos específicos, que não discutiremos neste artigo, equilibra-se a percepção dos sons emitidos a diferentes frequências, de forma que os percebamos de forma mais homogênea, dando

a sensação de equilíbrio sonoro.<sup>5</sup>

Um último item a ser considerado sobre a percepção do som é o decibelímetro, aparelho que mede o nível de intensidade sonora. Ele não distingue se o som é um ruído, como o de um giz escrevendo sobre um quadro, ou um tom puro, como um oriundo de um diapasão. Outra característica desse instrumento é que ele deve medir uma grandeza que não dependa explicitamente da frequência do som, visto que o nosso cotidiano é uma grande confusão sonora, composta por conversas, ruídos de máquinas e automóveis, sons da natureza, etc. Esse aspecto é fundamental para os fins deste trabalho. Mas, antes, precisamos olhar de perto algumas relações da acústica.

### Equações da física acústica

Primeiramente, analisemos a intensidade  $I$  da onda sonora. Por definição, a intensidade é o fluxo médio de energia por unidade de área e tempo,  $I \equiv \nu E$ , onde  $E$  é a densidade volumétrica de energia do elemento de volume [10]. Se lembrarmos que a energia mecânica total de um oscilador harmônico é dada por  $\frac{1}{2}m\omega^2A^2$  e observando que, em nossa situação, a amplitude da onda de deslocamento  $\mathcal{X}_0$  faz o papel da amplitude do oscilador harmônico  $A$  e a densidade de equilíbrio do ar  $\rho_0$

**O decibelímetro é um aparelho que não distingue se o som é um ruído, como o de um giz escrevendo sobre um quadro, ou um tom puro, como um oriundo de um diapasão**

o da massa do oscilador  $m$  [10], a intensidade  $I$  de uma onda sonora pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$I = 2\pi^2\rho_0\nu\mathcal{X}_0^2f^2. \quad (3)$$

Como acabamos de mencionar, devido à mistura frenética de ruídos e sons com frequências distintas em nosso dia a dia, um decibelímetro não trabalha diretamente com a relação dada pela Eq. (3). Quando um baterista toca a pele de um tambor, o som resultante é uma combinação de sons com inúmeras frequências diferentes, cujo resultado final depende do diâmetro do tambor, da madeira que é utilizada na sua construção, do tipo de pele escolhida pelo baterista, do local da pele que é tocado, do modelo da baqueta utilizada, da tensão da pele, da acústica local, etc. Dito de outra maneira, essa superposição de frequências define cada som que escutamos durante uma música, como o dos batusques dos tambores ou o das notas de um solo da guitarra, tal que cada nota (onda sonora) é dada por uma combinação entre sua frequência fundamental e várias ondas menores, chamadas de harmônicos.<sup>6</sup>

Consideremos um baterista que toca com sua baqueta na pele superior de um tambor. Quanto maior for a intensidade do toque, isto é, quanto mais energia e momento forem transferidos da baqueta para a pele do tambor, maior será o volume da nota, ou seja, a pressão sonora será maior. Com o toque de maior intensidade, a pele do tambor, ou mesmo o prato, passará a vibrar com maior amplitude.

De outra maneira, podemos fazer uma análise quantitativa e intuitiva dessa situação utilizando a técnica da análise dimensional<sup>7</sup> e ir além de apenas dizer que há uma relação de proporcionalidade entre  $\mathcal{P}_0$  (amplitude da onda de pressão) e  $\mathcal{X}_0$ . Assim, evitamos as deduções matemáticas que são feitas nos livros universitários que abordam esse assunto e advogamos sobre a importância do ensino da análise dimensional, tanto no nível médio quanto no universitário.

Quando uma onda sonora perturba um elemento de gás, a pressão  $p$  do lado

$A$  do pequeno cilindro será maior do que a pressão  $p'$  exercida sobre  $A'$  (base oposta do cilindro), gerando uma força sobre o elemento de altura  $A dx$ , que passa a se deslocar

de uma quantidade  $\mathcal{X}$ ; já  $A'$  se desloca  $\mathcal{X}'$ , tal que a altura do cilindro deslocado é  $dx + d\mathcal{X}$  (veja a Fig. 3). Assim, a variação da pressão de um elemento de volume de



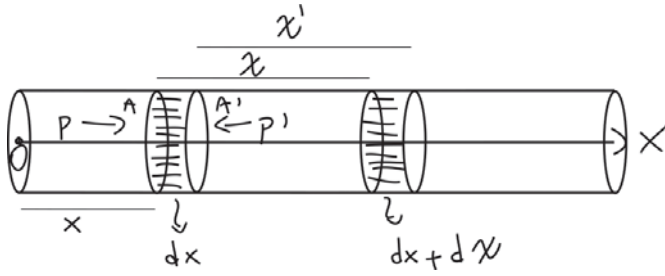


Figura 3: Onda de pressão em uma coluna de gás, baseada na Ref. [10].

gás dependerá da taxa de variação do seu deslocamento em relação à sua posição, ou seja, de  $\partial X/\partial x$ . Admitindo, então, a forma harmônica da onda de deslocamento dada pela Eq. (1), sua derivada com relação à posição  $x$  nos mostra que a amplitude da onda de pressão  $\mathcal{P}_0$  depende da amplitude da onda de deslocamento  $\mathcal{X}_0$  e do número de onda  $k$ , que por sua vez depende de  $f$  e  $v$ . Ademais, devido à alta compressibilidade do gás, a densidade de equilíbrio do ar  $\rho_0$  também é relevante para o problema.

Essa análise nos indica que  $\mathcal{P}_0$  é quantidade que depende, em princípio, das variáveis  $\mathcal{X}_0, f, \rho_0$  e  $v$ , tal que escrevemos a seguinte relação funcional:  $\mathcal{P}_0 = g(\mathcal{X}_0, f, \rho_0, v)$ . De fato, essa é a parte mais complicada do processo: “enxergar” quais são as quantidades que podem ser relevantes para o problema. Em seguida, escrevemos  $\mathcal{P}_0$  como um monômio dessas grandezas [12]:<sup>8</sup>

$$\mathcal{P}_0 = C \mathcal{X}_0^{\alpha_1} f^{\alpha_2} \rho_0^{\alpha_3} v^{\alpha_4}, \quad (4)$$

onde  $C$  é uma constante adimensional e os expoentes  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  e  $\alpha_4$  são inteiros ou racionais, positivos ou negativos, a serem determinados. Do lado esquerdo da Eq. (4), as dimensões de pressão são dadas em termos das dimensões de força e de área:<sup>9</sup>  $[\mathcal{P}_0] = [F][\text{área}]^{-1} = MLT^{-2}L^{-2} = L^{-1}MT^{-2}$ . Do lado direito,  $[\mathcal{X}_0]^{\alpha_1} = L^{\alpha_1}$ ,  $[f]^{\alpha_2} = T^{-\alpha_2}$ ,  $[\rho_0]^{\alpha_3} = M^{\alpha_3}T^{-3\alpha_3}$  e  $[v]^{\alpha_4} = L^{\alpha_4}T^{-\alpha_4}$ , além de  $[C] = 1$ . Precisamos, então, resolver o seguinte sistema de três equações para quatro incógnitas:

$$L^{-1} M T^{-2} = L^{\alpha_1 - 3\alpha_3 + \alpha_4} M^{\alpha_3} T^{-\alpha_2 - \alpha_4}. \quad (5)$$

O sistema admite infinitas soluções, mas estamos interessados em somente uma, a que relaciona adequadamente essas grandezas. Vejamos o que nos é razoável. Imediatamente, constatamos que  $\alpha_3 = 1$ . Daí, segue que  $\alpha_1 + \alpha_4 = 2$  e  $\alpha_2 + \alpha_4 = 2$ , o que nos fornece  $\alpha_2 = \alpha_4$ . Neste momento, lembremos que, em princípio, esperamos que quanto maior for  $\mathcal{X}_0$ , maior será  $\mathcal{P}_0$ . Supondo uma relação de proporção linear entre essas grandezas, ou seja, escolhendo  $\alpha_1 = 1$ , obtemos

$\alpha_2 = \alpha_4 = 1$ . Dessa forma, por meio da técnica da análise dimensional, concluímos que a relação

$$\mathcal{P}_0 = C \mathcal{X}_0 f \rho_0 v \quad (6)$$

é uma solução possível para o sistema. O valor de  $C$  não pode ser obtido seguindo esse raciocínio. A relação exata é dada por [9, 10]:

$$\mathcal{P}_0 = 2\pi v \rho_0 f \mathcal{X}_0, \quad (7)$$

onde  $C = 2\pi$ . De fato, a escolha  $\alpha_1 = 1$  foi adequada. Essa equação é extremamente útil em acústica e podemos resolvê-la tanto para  $\mathcal{P}_0$  como para  $\mathcal{X}_0$ .<sup>10</sup>

As Eqs. (3) e (7) relacionam, respectivamente, a intensidade e a amplitude da onda de pressão com a amplitude da onda de deslocamento, e ambas dependem da frequência. E isso não é interessante para fins práticos, conforme já mencionamos. Contornamos o problema resolvendo a Eq. (7) para  $f$  e substituindo na Eq. (3), o que nos leva a uma outra importante relação da acústica, agora entre a intensidade e a amplitude da onda de pressão:

$$I = \frac{\mathcal{P}_0^2}{2\rho_0 v}. \quad (8)$$

Observemos que esse resultado não depende das frequências. E era justamente

isso que desejávamos, pois o decibelímetro não mede uma intensidade para cada frequência do meio no qual se faz a medida e depois compila todos os resultados em um único número final. O decibelímetro mede pressão, ou variações de pressão, independentemente da frequência de cada som, o que é muito mais inteligente do ponto de vista prático.

Com todas essas relações da acústica em mãos, organizamos uma sequência na próxima seção com o objetivo final de estimarmos a ordem de grandeza das amplitudes das ondas de deslocamento; em outras palavras, pretendemos analisar quantitativamente o movimento vibratório do ar que se dá quando energia e momento se propagam da fonte sonora até o ouvinte.

### A proposta

O decibelímetro mede o nível da intensidade sonora em dB. Com o valor de  $\alpha$  em mãos, a Eq. (2) nos permite calcular a intensidade da onda sonora:

$$I = 10^{\left(\frac{\alpha}{10} - 12\right)}. \quad (9)$$

Uma vez que tenhamos a intensidade calculada, com a Eq. (8), encontramos a amplitude da onda de pressão correspondente por meio da relação:

$$\mathcal{P}_0 = \sqrt{2\rho_0 v I}. \quad (10)$$

Por fim, a Eq. (7) pode ser resolvida para a amplitude da onda de deslocamento:

$$\mathcal{X}_0 = \frac{\mathcal{P}_0}{2\pi v \rho_0 f}. \quad (11)$$

Esse é o percurso teórico da atividade, cuja intenção é calcular a amplitude da onda de deslocamento  $\mathcal{X}_0$  para cada frequência  $f$  ou som desejado. Pretendemos estimar a ordem de grandeza de vibração



Figura 4: Representação de um decibelímetro em uso. Na prática, o aparelho compila, simultaneamente, pressões sonoras oriundas de ruídos e sons de diferentes frequências.

das moléculas do ar durante a propagação do som e, conseqüentemente, o grau de precisão que nosso ouvido é capaz de detectar. A parte prática é dividida em três momentos. No primeiro, são coletadas medidas de níveis de intensidade. No segundo, são analisados esses valores, bem como as curvas de igual audibilidade (Fig. 2), com base nessas equações. No terceiro e último, é proposta uma atividade para os alunos.

O primeiro passo é escolher a(s) fonte(s) sonora(s) que será(ão) utilizada(s) na atividade. Embora tenhamos argumentado ao longo do texto acerca do fato de estarmos expostos a uma mistura de ruídos e sons, para fins didáticos sugerimos trabalhar com medidas de fontes virtuais com emissão de ondas senoidais, o que simplifica significativamente a atividade.<sup>11</sup> Utilizamos o “Online Tone Generator”, disponível gratuitamente na internet. Sua interface limpa otimiza sua utilização e o torna agradável para os alunos (veja a Fig. 5).<sup>12</sup> Se a maioria dos alunos possui smartphones ou tablets, pode-se utilizar algum aplicativo como fonte geradora de som, como por exemplo o “Frequency Sound Generator”, disponível gratuitamente para Android. Isso envolve mais os alunos e deixa a atividade mais dinâmica e motivante para eles. No nosso caso, utilizamos um notebook (do professor) como fonte sonora.

Como receptor, atuando como o decibelímetro, foi utilizado o “Decibelímetro”, aplicativo gratuito disponível para o Android (veja a Fig. 6).

Ele possui várias funcionalidades que podem ser exploradas pelo professor, como a plotagem de um gráfico  $\alpha \times t$ , as medidas mínima e máxima obtidas e tam-

**A sequência proposta permite estimar a ordem de grandeza de vibração das moléculas do ar durante a propagação do som e, conseqüentemente, o grau de precisão que nosso ouvido é capaz de detectar**

bém o nível de intensidade médio da coleta.<sup>13</sup> Ao clicar no ícone com a letra M dentro de um círculo, é exibida uma lista de níveis sonoros de exemplos do nosso cotidiano, o que contextualiza ainda mais a atividade. Um comentário final sobre esse aplicativo é sobre a língua inglesa. Entendemos que ela não seja um obstáculo para seu uso; muito pelo contrário: estimula a interdisciplinaridade, algo tão debatido e almejado na literatura.



Figura 5: Interface do gerador de tons puros.

O exemplo ilustrado nas Figs. 4 e 5 traz um nível de intensidade de 61 dB para a frequência de 1000 Hz. Com a Eq. (9), encontramos que o valor da intensidade sonora correspondente é  $I_{61dB} = 1,26 \times 10^{-6} \text{ Wm}^{-2}$ . Por sua vez, a Eq. (10) nos fornece a amplitude da onda de pressão correspondente:  $\mathcal{P}_{0,61dB} = 3,2 \times 10^{-2} \text{ Nm}^{-2}$ . Finalmente, com a Eq. (11) concluímos que a amplitude de deslocamento da onda é da ordem de  $10^{-8} \text{ m}$  – mais precisamente,  $\mathcal{X}_{0,61dB,1000Hz} = 1,25 \times 10^{-8} \text{ m}$ . Esse valor é cerca de cem mil vezes menor do que um milímetro. Nos cálculos, sob condições normais de temperatura e pressão, utilizamos  $\rho_0 = 1,225 \text{ kg/m}^3$  e  $v = 332 \text{ m/s}$ .

Uma análise interessante é obtida a partir do ponto mínimo da curva de 0 fon (ver Fig. 2), cuja frequência corresponde, aproximadamente, a 3500 Hz, frequência fundamental do canal auditivo.<sup>14</sup> Ela diz respeito ao nível mais fraco de som que somos capazes de perceber, com nível de intensidade próximo de  $-8 \text{ dB}$ ; como já discutimos, esse valor negativo não representa problemas físicos. Para esses valores, as equações desta seção nos fornecem  $I_{-8dB} = 1,58 \times 10^{-13} \text{ Wm}^{-2}$ ,  $\mathcal{P}_{0,-8dB} = 1,14 \times 10^{-5} \text{ Nm}^{-2}$  e  $\mathcal{X}_{0,-8dB,3500Hz} = 1,27 \times 10^{-12} \text{ m}$ . Esse é o limite inferior de vibração que nosso ouvido pode detectar. Ou seja, nosso ouvido é uma estrutura complexa e extremamente sensível, capaz de detectar sons cujas ordens de grandeza das danças das moléculas de ar, ou das amplitudes de deslocamento, são da ordem das escalas atômicas e moleculares!

Após essa etapa, sugerimos que seja proposta uma atividade para os alunos, com o objetivo de fixar e aprofundar os estudos feitos até o momento. Ela pode ter a forma de exercício em sala, individual ou em grupo, ou trabalho para casa; e, inclusive, pode ser avaliativa. A ideia é construir, para cada frequência, uma tabela que relacione níveis de intensidade diferentes com a respectiva intensidade, amplitude da onda de pressão e amplitude da onda de deslo-

Tabela 1: Para cada frequência são estimadas as amplitudes das ondas de deslocamento referentes a diferentes níveis de intensidade. Às frequências graves, associam-se vibrações de ordens de grandeza maiores; às agudas, menores. E quanto maior o nível de intensidade e a própria intensidade, as amplitudes das vibrações das moléculas de ar também são maiores.

$\alpha$ (dB)	$I$ ( $\text{W/m}^2$ )	$\mathcal{P}_0$ ( $\text{N/m}^2$ )	$\mathcal{X}_0$ (m), $f = 50 \text{ Hz}$	$\mathcal{X}_0$ (m), $f = 5000 \text{ Hz}$
0	$1 \times 10^{-13}$	$2,85 \times 10^{-5}$	$2,23 \times 10^{-10}$	$2,23 \times 10^{-12}$
50	$1 \times 10^{-7}$	$9,02 \times 10^{-3}$	$7,06 \times 10^{-8}$	$7,06 \times 10^{-10}$
100	$1 \times 10^{-2}$	$2,85 \times 10^0$	$2,54 \times 10^{-6}$	$2,23 \times 10^{-7}$

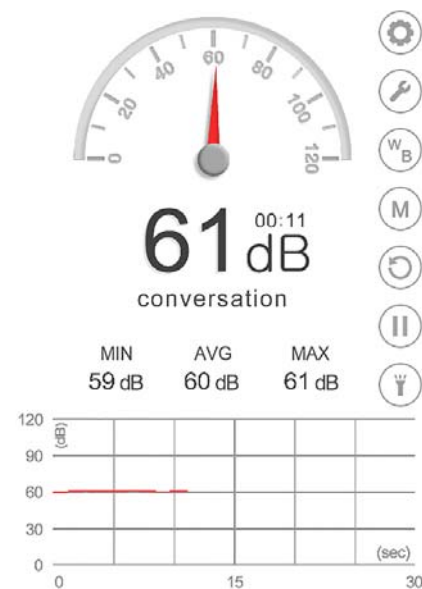


Figura 6: Interface do decibelímetro.

camento. Em seguida, deve-se analisar os resultados à luz das curvas de igual audibilidade. A Tabela 1 traz os valores para um som dito grave, com  $f = 50 \text{ Hz}$ , que pode ser ouvido apenas para níveis de intensidade maiores do que 50 dB, aproximadamente, e para um som dito agudo, com  $f = 5000 \text{ Hz}$ , que é perceptível a partir de níveis de intensidade pouco menores do que 10 dB.

Complementarmente à construção dessas tabelas, pode-se pedir para os alunos se concentrarem (em silêncio) para verificar a partir de que nível de intensidade (indicado pelo decibelímetro) eles passam a escutar cada frequência reproduzida pelos alto-falantes. Deve-se, então, comparar a percepção dos alunos com o limiar de audibilidade para a respectiva frequência, sobre a curva de 0 fon. Caso seja possível, dependendo da qualidade dos alto-falantes utilizados, pode-se dar uma ênfase nos extremos do espectro sonoro, ou seja, nos sons mais graves e mais agudos, que são mais difíceis de serem percebidos do que os sons médio agudos.

Por fim, frisemos que o valor em vermelho da Tabela 1 indica, em concordância

com a Fig. 2, que um som com frequência de  $f = 50$  Hz não é audível a 0 dB. Comparando a amplitude de deslocamento correspondente com a de 5000 Hz, ou para frequências agudas em geral, observamos que a percepção dos sons não diz respeito à ordem de grandeza da amplitude da onda de deslocamento; afinal, é exigida uma precisão maior para a detecção de sons mais agudos, mas isso diz respeito à natureza do ouvido humano. Dito de outra maneira, para frequências cada vez mais baixas, isto é, sons mais graves, as amplitudes das ondas de deslocamento são cada vez maiores. Poderíamos nos perguntar, então, por que os sons graves, aparentemente “exigindo uma menor precisão” do nosso ouvido, são mais difíceis de serem distinguidos uns dos outros? Essa é uma questão que deixamos para discutir em outra oportunidade.

**Aspectos relacionados à física do som mencionados neste artigo, como o alinhamento do sistema sonoro, bem como a própria questão do conforto acústico, do uso social da ciência e da tecnologia, ou mesmo a biofísica do ouvido humano, podem ser aprofundados durante a atividade ou até mesmo constituírem temas de outros projetos**

### Ensaio didático

A atividade proposta e as ideias abordadas neste artigo foram trabalhadas em duas turmas de segunda série do Ensino Médio integrado ao técnico de um instituto federal. Em cada turma, a atividade foi realizada no ano de 2016 em dois encontros (dois dias de duas semanas consecutivas), sendo cada encontro de duas aulas de cinquenta minutos cada, totalizando duzentos minutos com cada turma. Antes da atividade, os alunos das turmas já tiveram contato com ideias introdutórias acerca das ondas sonoras. Na ocasião, a atividade envolveu todos os tópicos discutidos neste artigo concernen-

tes à sequência proposta. Basicamente, o primeiro encontro foi dedicado aos estudos das equações da biofísica e às curvas de igual audibilidade. As atividades práticas e discussões concentraram-se no segundo encontro.

O ponto negativo observado foi o uso das funções exponenciais e logarítmicas. Todavia, acreditamos que os percalços valem todo o esforço. Afinal, ninguém disse que seria fácil promover uma educação crítica e que fosse além dos livros didáticos tradicionais. Como pontos positivos, destacamos o envolvimento dos alunos durante a parte prática, principalmente durante a reprodução dos sons e a medição dos níveis de intensidade com o aplicativo dos *smartphones* como decibelímetro, e também durante o exercício de se perceber qual é o som mais fraco possível que somos capazes de perceber para cada frequência. Eles se mostraram interessados em comparar os resultados obtidos com a curva de 0 fon e entusiasmados em saber que nossos ouvidos têm grande poder de precisão na detecção de vibrações da ordem de escalas atômicas.

### Considerações finais

Neste artigo, trouxemos conceitos, ideias e equações que não se fazem presentes nas aulas de física que são pautadas nos livros didáticos tradicionais do Ensino Médio. Discutimos as ondas sonoras, dando maior ênfase às relações da física acústica, as quais nos permitiram estimar as ordens de grandeza envolvidas na propagação e percepção do som, especificamente

das amplitudes das ondas de deslocamento. Nossos cálculos evidenciaram que a oscilação das moléculas de ar é da ordem das escalas atômicas e moleculares.

Precisamos também ressaltar que o nosso comentário sobre a tradição dos livros de física do Ensino Médio em introduzir o assunto de ondas com ondas em cordas não é uma crítica necessariamente negativa. Todavia, passa a ser quando não há nenhum esforço para se ir além disso, tanto em relação aos autores dos livros quanto aos próprios professores. O que não se pode, segundo nossa visão, é ser negligente sobre questões que podem ser estimulantes para os estudantes. Se as editoras não se preocupam com isso, sejam quais forem suas razões, nós, professores e pesquisadores, devemos fazê-lo. E a ideia deste artigo é justamente auxiliar os professores a dar esse passo, tanto no que se refere ao planejamento de suas aulas como à sua aplicação e avaliação. Obviamente, não temos a pretensão de oferecer uma receita infalível para o sucesso do ensino das ondas sonoras. Os professores podem e devem fazer escolhas, omissões e saltos, dependendo de fatores culturais, planejamento escolar, tempos das aulas, receptividade dos alunos, etc.

Outrossim, ressaltamos que alguns aspectos relacionados à física do som mencionados neste artigo, como o alinhamento do sistema sonoro, bem como a própria questão do conforto acústico, do uso social da ciência e da tecnologia, ou mesmo a biofísica do ouvido humano, podem ser aprofundados durante a atividade ou até mesmo constituírem temas de outros projetos. Em outra ocasião, ambas as turmas realizaram projetos interdisciplinares sobre a poluição sonora; essa atividade foi orientada pelas Ilhas Interdisciplinares de Racionalidade, propostas por Gerard Fouriez. Deixemos essa ocasião para outro momento.

### Referências

- [1] D.D. Moura e P. Bernardes Neto, *A Física na Escola* **12**, 12 (2011).
- [2] E. M. Santos, C. Molina e A.P.B. Tufaile, *Rev. Bras. Ens. Fís.* **35**, 2507 (2013).
- [3] H.A. Errobidart e Cols., *Rev. Bras. Ens. Fís.* **36**, 1507 (2014).
- [4] F. Catelli e G.A. Mussato, *Rev. Bras. Ens. Fís.* **36**, 2304 (2014).
- [5] S.M. Coelho e G.R. Machado, *Cad. Bras. Ens. Fís.* **32**, 207 (2015).
- [6] N.E. Souza Filho, B.A. Gonçalves e V.T. Oliveira, *Rev. Bras. Ens. Fís.* **37**, 2313 (2015).
- [7] D.A. Magalhães e J. Pinho Alves Filho, *Cad. Bras. Ens. Fís.* **34**, 331 (2017).
- [8] R.P. Feynman, R.B. Leighton e M. Sands, *Licões de Física de Feynman, vol. 1* (Bookman, Porto Alegre, 2008).
- [9] M. Nussenzveig, *Curso de Física Básica, vol. 2* (Edgar Blucher, São Paulo, 2002).
- [10] M. Alonso e E.J. Finn, *Física: Um Curso Universitário, vol. 2* (Edgar Blucher, São Paulo, 1972).
- [11] H. Fletcher and W.A. Munson, *J.A.S.A.* **5**, 82 (1933).
- [12] D. Trancanelli, *Rev. Bras. Ens. Fís.* **38**, e2505 (2016).

### Notas

<sup>1</sup>É preciso que façamos algumas simplificações. Uma delas é considerar que o movimento ocorra em uma única dimensão, de forma que para grandes distâncias entre a fonte sonora e o ouvinte, em comparação com as distâncias percorridas pelas moléculas de ar, as ondas podem ser consideradas como planas [8]. Veja outras considerações na mesma referência, por exemplo.



<sup>2</sup>Suas deduções fogem do escopo deste artigo. Para o leitor interessado, as Refs. [8-10] mostram como deduzir as equações de movimento do problema e encontrar suas soluções.

<sup>3</sup>Não mencionamos os fatores biofísicos. A Ref. [7], por exemplo, discute alguns deles.

<sup>4</sup>Se  $\alpha = 10 \log_{10}(I/I_0)$ ,  $\alpha' = 10 \log_{10}(2I/I_0) = 10 \log_{10}(I/I_0) + 10 \log_{10}(2) = \alpha + 3$ .

<sup>5</sup>Alguns softwares e aplicativos de celulares, como o “*RTA Audio Analyzer*”, para Android, auxiliam no alinhamento do som.

<sup>6</sup>Não entraremos em detalhes sobre esse assunto. Para o leitor interessado, sugerimos as Refs. [8-10].

<sup>7</sup>Em artigo recente, Trancanelli [12] apresenta uma revisão bastante acessível sobre a técnica da análise dimensional. Convidamos o leitor a visitar esse interessante artigo, que traz inúmeros exemplos de como estimar a dependência de uma grandeza em relação a outras relevantes da situação, sem fazer contas complicadas, ou seja, sem resolver a equação diferencial do problema.

<sup>8</sup>Reiteramos que a compreensão desse procedimento requer um detalhamento que foge do escopo deste artigo. Sugerimos que o professor não familiarizado com a técnica da análise dimensional visite, por exemplo, o já referido artigo de Trancanelli [12].

<sup>9</sup>Neste artigo, trabalharemos com três dimensões primitivas, comprimento, tempo e massa, as quais são designadas, respectivamente, por  $L$ ,  $T$  e  $M$ .

<sup>10</sup>Uma outra maneira de se chegar à Eq. (7) é a seguinte: tem-se que a variação de pressão  $\Delta P$  depende do produto  $\mathcal{X}_0 k$ . Todavia, observamos que esse produto é adimensional. Logo, ele deve ser multiplicado por uma quantidade que tenha unidades de pressão. Assim, podemos combinar a velocidade de propagação do som  $v$  e a densidade de equilíbrio do ar  $\rho_0$ , duas quantidades referentes a propriedades do meio e que são relevantes para a situação em questão. Combinadas, elas definem o módulo de elasticidade volumétrica do gás:  $v^2 \rho_0$  [10]. Ficamos, então, com a relação  $\Delta P \sim \mathcal{X}_0 k v^2 \rho_0$ . A quantidade do lado direito é a própria amplitude da onda de pressão  $\mathcal{P}_0 = 2\pi v \rho_0 f \mathcal{X}_0$  [10].

<sup>11</sup>Por exemplo, evitamos falar das séries de Fourier.

<sup>12</sup>Disponível no link: <http://www.szynalski.com/tone-generator/>. Outra sugestão é o simulador “Som”, também gratuito e disponível no link: [https://phet.colorado.edu/pt\\_BR/simulation/legacy/sound](https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/sound). Este último oferece vários recursos que não são explorados nesta atividade, como interferência.

<sup>13</sup>A calibração do microfone é feita no próprio aplicativo e é fundamental para garantir a confiabilidade dos resultados.

<sup>14</sup>Esse cálculo pode ser visto, por exemplo, na Ref. [7].



# Medida da temperatura de lâmpadas incandescentes usando o LDR e a placa Arduino

.....

**José Wagner Cavalcanti Silva**

Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Pau dos Ferros, RN, Brasil

**Karolayne Santos Azevedo**

Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Pau dos Ferros, RN, Brasil

**Glaydson Francisco Barros de Oliveira**

Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Pau dos Ferros, RN, Brasil  
E-mail: glaydson.barros@ufersa.edu.br

.....

## Introdução

**P**ara Cavalcante e cols. [1], o computador vem sendo utilizado como um agente transformador no processo de ensino aprendizagem de física, especialmente pelo fato de esse ser uma importante ferramenta cognitiva, que a passos curtos vem ocupando os espaços educacionais como instrumento de laboratório, seja pela falta de formação docente, seja pela dificuldade em adquirir interfaces e programas de aquisição. Nesse sentido, é notório que o computador é um componente fundamental de um sistema de aquisição de dados baseado numa placa microcontrolada, que, aglutinado com modelagem computacional, torna a aula um local mais dinâmico de aprendizagem significativa. A utilização da placa microcontrolada (Arduino) nos laboratórios didáticos de física tem sido uma alternativa na construção de instrumentos de medidas com um custo baixo para as atividades práticas laboratoriais. Além dessa vantagem, elencamo-na como uma poderosa ferramenta de motivação para os alunos, uma vez que o código é livre, permitindo programar o microcontrolador que compõe a placa e observar os efeitos decorrentes dessa ação. Portanto, seu uso pode ser intermediado pelo professor como uma porta de acesso ao desenvolvimento de conceitos básicos de física nas suas diversas áreas, pois para que o microcontrolador possa executar os procedimentos escritos em seu código fonte é necessário ter conhecimentos das equações que descrevem o fenômeno físico em estudo.

Para desenvolvermos um instrumento que possa medir a temperatura do fila-

mento de tungstênio que compõe a lâmpada incandescente, precisamos de um dispositivo que tenha a propriedade de variar a resistência elétrica em função do fluxo de radiação incidente. Para esse fim, temos, graças ao desenvolvimento da tecnologia, dispositivos como fotodiodos e fototransistores. Neste trabalho, optamos por utilizar o LDR (Light Dependent Resistor) como detector de radiação. Esse projeto de construir um instrumento de baixo custo com o Arduino para medir a temperatura de lâmpadas incandescentes tem como expectativa que todo esse processo de construção e calibração permita que o estudante possa dar significado a conceitos físicos e matemáticos envolvidos para se atingir o objetivo proposto. É nas dificuldades encontradas no processo de construção e calibração que o estudante percebe a necessidade de uma ferramenta matemática ou de um conceito físico para poder contornar certos obstáculos. Portanto, de modo a proporcionar essa experiência ao aluno é que delineamos a cadeia de raciocínios descrita nas seções deste trabalho para habilitar o Arduino a medir

a temperatura de lâmpadas incandescentes. É preciso salientar que se o objetivo fosse apenas medir a temperatura, bastaria coletar os dados desta e da tensão sobre um sensor que responda a

variação do fluxo luminoso e fazer uma regressão (linear ou não linear) e implementar a função ajustada no código fonte do Arduino. Entretanto, enfatizamos que o objetivo é muito mais didático do que fenomenológico.

## Função de Planck para a radiação de corpo negro

Todo corpo que possua uma temperatura diferente de zero Kelvin emite ra-

**o computador é um componente fundamental de um sistema de aquisição de dados baseado numa placa microcontrolada, que, aglutinado com modelagem computacional, torna a aula um local mais dinâmico de aprendizagem significativa**

---

Neste trabalho desenvolvemos uma forma de calibrar um instrumento capaz de medir a temperatura de lâmpadas incandescentes com base na radiação emitida por elas usando como detector o LDR (Light Dependent Resistance). No processo de calibração usamos a função de Planck, a emissividade do tungstênio e função que descreve o comportamento do LDR com o comprimento de onda da luz que incide sobre ele. Além da construção e da calibração do instrumento, buscamos usar a programação do Arduino como agente motivador para o entendimento de conceitos físicos e matemáticos envolvidos no processo.

dição térmica. Do ponto de vista mais geral, os detalhes do espectro eletromagnético da radiação térmica emitida por um corpo depende de alguma forma da composição deste, como é salientado por Eiseberg e Resnick [2]. Por outro lado, existe um corpo que emite espectros térmicos de caráter universal. A esse corpo damos o nome de corpo negro. A distribuição espectral de potência emitida por unidade de área e de ângulo sólido para um corpo negro é descrita pela função de Planck conforme De Witt e Nutter [3]:

$$F(\lambda, T) = \frac{c^2}{\lambda^5} \frac{2h}{(e^{hc/\lambda kT} - 1)}, \quad (1)$$

em que  $c \approx 2,998 \times 10^8$  m/s,  $h \approx 6,626 \times 10^{-34}$  m<sup>2</sup>kg/s,  $k \approx 1,381 \times 10^{-23}$  m<sup>2</sup>kg/s<sup>2</sup>K,  $\lambda$  e  $T$  são, respectivamente, a velocidade da luz, a constante de Planck, a constante de Boltzman, o comprimento de onda e a temperatura do corpo negro. O espectro da intensidade da energia irradiada pelo corpo depende do comprimento de onda e da temperatura que a emite (Fig. 1). Perceba que para cada temperatura temos um valor máximo para a irradiância e que esse valor se desloca para a esquerda na direção de comprimentos de onda menores. Esse deslocamento é conhecido como deslocamento de Wien.

### Light dependent resistor (LDR)

O LDR ou fotorresistência é um dispositivo semiconductor cuja resistência elétrica é função do fluxo luminoso incidente sobre sua superfície. O material semiconductor mais utilizado nesse dispositivo é o sulfeto de cádmio e o seleneto de cádmio. Com o aumento do fluxo luminoso incidente sobre sua superfície, sua resistência diminui e quando esse fluxo é pequeno, sua resistência aumenta. Atualmente, podemos encontrar no mercado LDRs cujos valores nominais da resistência variam da ordem de 100 Ω a 1 MΩ. O LDR usado neste trabalho possui limites de 400 Ω a 1 MΩ, de acordo com as especificações do seu fabricante. A equação que descreve como a resistência elétrica do LDR varia com o fluxo luminoso incidente é:

$$R = A I^B \quad (2)$$

onde  $I$  é a irradiância sobre o LDR e  $A$  e  $B$  são os parâmetros que estimaremos a partir de uma regressão não linear. Por outro lado, a irradiância sobre o LDR está definida dentro de um ângulo sólido  $\omega = \pi r^2/d$ , em que  $r$  é o raio do detector e  $d$  sua distância da fonte de luz. Dessa forma, a Eq. (2) pode ser reescrita:

$$R = A \omega^B I^B \quad (3)$$

É imprescindível destacar que a sensi-

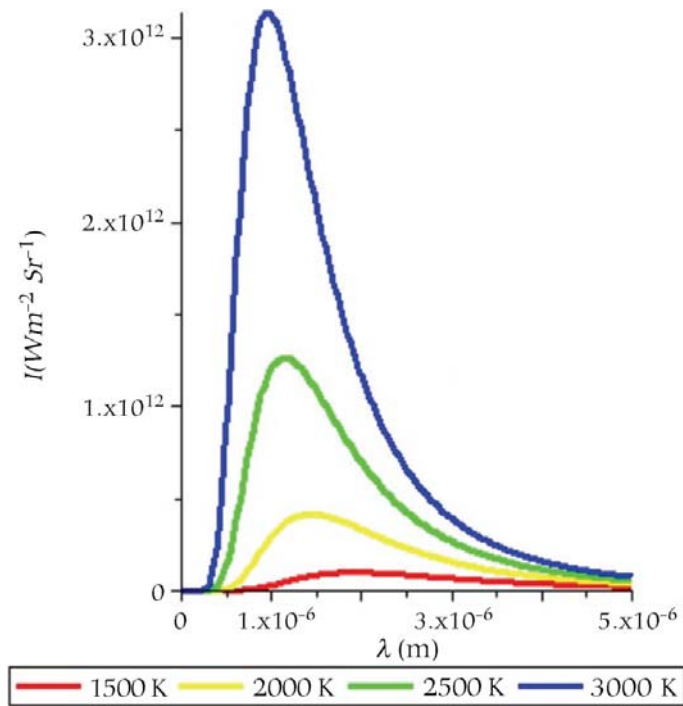


Figura 1: Distribuição espectral da radiação para um corpo negro em diferentes temperaturas.

bilidade do LDR não é igual para todos os comprimentos de onda do espectro da radiação que incide sobre ele. Esse dispositivo foi projetado para ter maior sensibilidade na região do visível, mas mesmo nessa região sua sensibilidade tem uma dependência muito forte do comprimento de onda. O filamento de tungstênio irradiará em todos os comprimentos de onda, seguindo, aproximadamente, a função de distribuição de Planck. A informação sobre a resposta do LDR aos diferentes comprimentos de onda do espectro visível pode

ser obtida no datasheet fornecido pelo fabricante, indicado na seção de endereços. A Fig. 2 ilustra o comportamento da resposta espectral do LDR.

A Fig. 3 mostra o esquema do circuito elétrico auxiliar à montagem experimental para a leitura. Perceba que a sensibilidade do LDR é maior na região dos comprimentos de onda compreendidos entre 540 nm e 560 nm. Por isso, para a estimativa da curva de calibração do instrumento proposto, deve-se levar em consideração a resposta espectral.

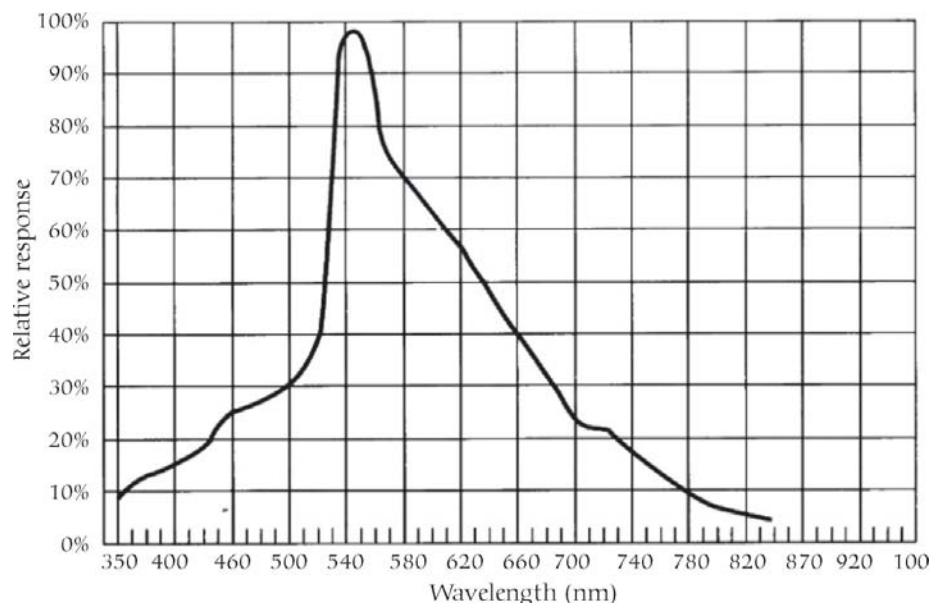


Figura 2: Curva da resposta espectral do LDR.



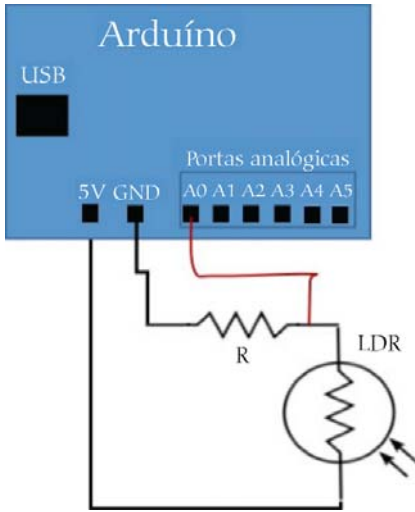


Figura 3: Esquema do circuito de detecção.

O circuito elétrico usado para a leitura da radiação proveniente da lâmpada incandescente é alimentado pela própria placa do Arduino e é composto por um LDR e um resistor de 400 k $\Omega$ , cujo valor foi escolhido de modo a compensar o aumento da resistência do LDR, produzido pelo fato de as medidas terem sido realizadas em ambiente sem luminosidade. Como esses componentes estão conectados em série, a diferença de potencial será dividida entre eles. Portanto, a resistência  $R$  deve estar na mesma ordem de grandeza da resistência do LDR.

O Arduino, por meio da porta analógica, realiza a leitura da tensão sobre o resistor  $R$  em série com o LDR. A partir da lei das tensões de Kirchhoff obtemos a resistência do LDR em função da tensão sobre a resistência  $R$ :

$$R_{LDR} = \frac{(5 - V_R) R}{V_R} \quad (4)$$

Ao centralizarmos o LDR com a fonte de luz, teremos o valor da sua resistência por meio da Eq. (4), que será escrita no código-fonte do Arduino. Após estimarmos os parâmetros da Eq. (2), que apresentaremos mais adiante, substituímos o valor da resistência nessa equação e obtemos o valor da irradiância sobre o LDR. É importante lembrar que todo processo de medição é afetado por incertezas. Assim, é preciso estimar as incertezas nas medidas de  $R_{LDR}$  que são realizadas indiretamente pelo Arduino. Porém, como não foi possível obter informações sobre as incertezas nas medidas de tensão do Arduino, contornamos o problema tomando as medidas da tensão sobre a resistência  $R$  fornecidas pelo Arduino e calculamos o desvio-padrão do valor médio dessas medidas  $\sigma_{V_R}$ . Considerando que o valor da resistência  $R$

é isenta de incertezas, podemos escrever a incerteza na medida de  $R_{LDR}$  aplicando a regra de propagação de incertezas [4 -5]:

$$\sigma_{R_{LDR}} = \sqrt{\left(\frac{\partial R_{LDR}}{\partial R} \sigma_R\right)^2 + \left(\frac{\partial R_{LDR}}{\partial V_R} \sigma_{V_R}\right)^2} \quad (5)$$

$$\sigma_{R_{LDR}} = \frac{1}{AV_R} \sqrt{(5 - V_R)^2 \sigma_R^2 + \left(\frac{25R^2}{V_R^2}\right) \sigma_{V_R}^2} \quad (6)$$

Como o valor de  $R_{LDR}$  será usado para o cálculo de outras grandezas, o uso da Eq. (6) será necessária mais adiante.

### Medida indireta da temperatura do filamento de tungstênio

O primeiro passo para a construção do nosso instrumento de medida de temperatura por meio da radiação é medirmos a temperatura do filamento de tungstênio pelo denominado “método indireto”, descrito com detalhes no trabalho de Desai e cols. [6]. Esse método consiste em medir a temperatura do filamento através da resistência elétrica que este apresenta quando submetido a uma diferença de potencial (DDP). Como é de conhecimento, a resistência do filamento possui uma forte dependência com a variação da temperatura. A equação empírica obtida por Forsythe e Worthing [7] é a que tomamos como base para estimar a temperatura do filamento a partir das medidas de resistência elétrica.

$$T = T_0 \frac{R}{R_0}^\xi \quad (7)$$

em que  $\xi$  é igual a (1/1,20) e  $T$ ,  $R$ , são respectivamente a temperatura e a resistência elétrica do filamento quando submetido a uma dada DDP e  $T_0$ ,  $R_0$  são a temperatura ambiente e a resistência elétrica nessa temperatura. Deve-se ter muito cuidado na medida de  $R_0$ , pois pode-se tentar, erroneamente, medi-la com um multímetro. Tal procedimento não é aconselhável porque a bateria interna do multímetro fornecerá uma corrente elétrica ao filamento e possivelmente haverá um pequeno aquecimento do filamento, causando uma mudança na sua resistência, conforme Cavalcante [8]. Para estimar a resistência na temperatura ambiente, montamos um circuito elétrico em série, constituído por um resistor de 10 k $\Omega$  e uma lâmpada com filamento de tungstênio. Variamos a tensão de modo a fornecer uma pequena corrente ao circuito, que fluirá pelos componentes com mesmo valor nominal, então medimos a DDP sobre a lâmpada. A partir de uma regres-

são linear com os dados coletados de resistência e corrente, tomamos o limite em que a corrente seja nula, de modo que o coeficiente linear da reta de ajuste seja o valor da resistência na temperatura ambiente  $R_0$ . Com os valores de  $T_0$  e  $R_0$ , podemos estimar a temperatura do filamento. Para obter o valor de  $R$ , submetemos a lâmpada a diferentes valores de tensão e medimos a corrente que flui por ela. A partir da definição de resistência

$$R = \frac{V}{i}, \quad (8)$$

conseguimos estimar indiretamente a resistência  $R$  e substituímos seu valor na Eq. (7). A incerteza da medida indireta da resistência é dada por:

$$\sigma_R = \frac{1}{i} \left( \sigma_V^2 + V^2 \sigma_i^2 \right)^{1/2} \quad (9)$$

Dessa forma, temos que a incerteza na medida da temperatura com base na Eq. (7) é dada por:

$$\sigma_T = \left( \frac{R}{R_0} \right)^\xi \sqrt{\sigma_{T_0}^2 + \xi^2 T_0^2 \left( \frac{\sigma_{R_0}^2}{R_0^2} + \frac{\sigma_R^2}{R^2} \right)} \quad (10)$$

em que  $\sigma_{T_0}$ ,  $\sigma_{R_0}$ ,  $\sigma_R$  são, respectivamente, as incertezas nas medidas da temperatura ambiente, da resistência do filamento nessa temperatura e da resistência do filamento para determinados valores de tensão e corrente.

## Resultados e discussões

### Calibração do instrumento

Todo instrumento para desempenhar de modo efetivo seu papel, sendo matematicamente verificável e fisicamente possível, precisa ser calibrado. Para calibrar o nosso instrumento vamos usar a Eq. (11) para calcular a irradiância sobre o detector:

$$I = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} F(\lambda) f(\lambda) \varepsilon(\lambda) d\lambda, \quad (11)$$

em que  $F(\lambda)$ ,  $f(\lambda)$  e  $\varepsilon(\lambda)$  são, respectivamente, a função de Planck, a função que descreve a resposta do detector ao comprimento de onda e a emissividade do tungstênio.

A função  $\varepsilon(\lambda)$  é necessária porque o filamento de tungstênio não é um corpo negro perfeito. Desse modo, temos que a emissividade em função do comprimento de onda é:

$$\varepsilon(\lambda) = 0,571 - 2,32 \cdot 10^5 \lambda + 3,28 \cdot 10^{10} \lambda^2 \quad (12)$$

A função  $f(\lambda)$  descreve como o nosso

detector (LDR) responde aos comprimentos de onda que compõem a radiação que incide sobre ele. Consultamos a ficha de dados do LDR, mas não obtivemos informação sobre a mesma, apenas um gráfico que descreve a sua resposta em função do comprimento de onda mostrado na Fig. 2. Tomamos os valores expostos na Fig. 2 e fazemos uma interpolação por *spline* usando o programa Maple 14 e obtemos o ajuste representado na Fig. 4.

Para cada par de pontos no gráfico acima, o método de interpolação *spline* nos fornecerá um polinômio que se ajuste a eles. Selecionando o intervalo de comprimento de onda em que o LDR opera é possível programar o software para calcular a integral dentro desse intervalo.

A partir da Eq. (7) coletamos os dados da temperatura do filamento. A Tabela 1 mostra a magnitude das incertezas na medida indireta da temperatura.

É importante destacar que não coletamos uma quantidade considerável de dados devido ao efeito de reflexão que as paredes do laboratório proporcionavam. Assim, a lâmpada não foi acionada a potências mais altas, com intensidades luminosas mais altas, para evitar efeitos de espalhamento da luz no laboratório, que acabariam por dar uma contribuição como luz incidente sobre o LDR.

A Fig. 5 mostra o processo de calibração do instrumento. Variamos a tensão da lâmpada até um valor em que seu brilho não fosse muito intenso devido a evitar a reflexão pelas paredes do laboratório.

Substituindo os valores de temperatura da Tabela 1 na função de Planck,

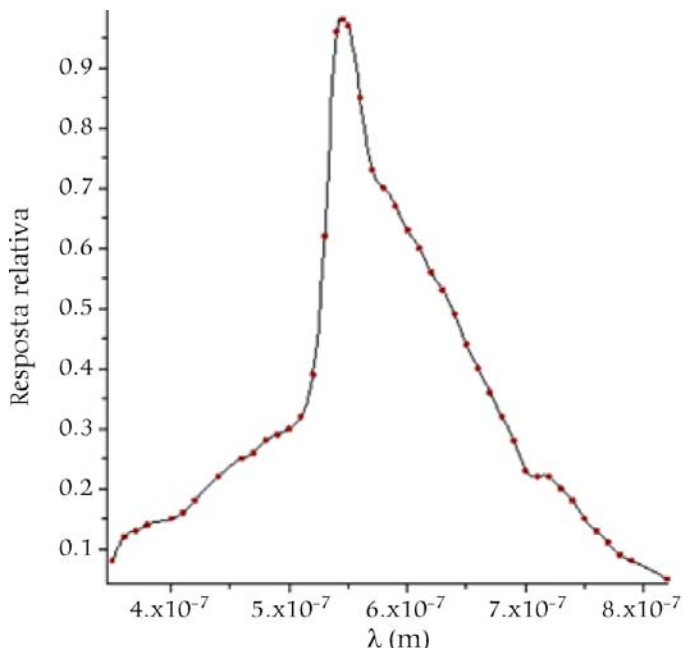


Figura 4: Ajuste por interpolação *spline*.



Figura 5: Fotografia mostrando o instrumento sendo calibrado.

podemos realizar a integração da Eq. (11) que nos fornecerá a irradiância do filamento. Com o LDR desconectado do circuito, medimos sua resistência com um multímetro para determinada irradiância. A partir dos dados de irradiância e resistência podemos estimar os coeficientes da

Tabela 1: Medidas das temperaturas do filamento e suas incertezas.

$T_p$ ( $10^3$ K)	$\sigma_T$ ( $10^3$ K)
1,20577	0,059
1,27828	0,058
1,34318	0,057
1,39448	0,057
1,44749	0,05
1,54298	0,056

Eq. (2). A função ajustada é dada pela Eq. (13) e o gráfico do ajuste pela Fig. 6.

$$R = 1469,43.I^{-0,605} \quad (13)$$

Com base nesses valores de irradiância e temperatura, podemos obter a função que descreve como a temperatura varia com a irradiância. O gráfico apresentado na Fig. 7 mostra a curva de dispersão da temperatura em função da irradiância.

Usando o método de regressão não linear e estimando os coeficientes para o seguinte tipo de função:

$$T(I) = \alpha.I^\beta \quad (14)$$

$$T(I) = 1233,21.I^{0,065} \quad (15)$$

Com base nas Eqs. (4), (2) e (14) temos,

$$T = \frac{\alpha}{\omega^\beta} \left[ \frac{(5-V_R)R}{AV_R} \right]^{\beta B^{-1}} \quad (16)$$

que é a expressão que será escrita no código-fonte do Arduino para medirmos a temperatura. A partir da Eq. (16) e usando a regra de propagação de incerteza, temos que a incerteza associada à medida da temperatura pelo o Arduino é:

$$\sigma_T = \left\{ \frac{1}{B^2} \left[ \frac{25\sigma_{V_R}}{(5-V_R)^2 V_R^2} + \frac{\sigma_R^2}{R^2} \right] + \frac{\sigma_\omega^2}{\omega^2} \right\}^{1/2} \times \frac{\alpha\beta}{\omega^\beta} \left[ \frac{(5-V_R)R}{V_R} \right]^{\beta B^{-1}} \quad (17)$$

Como discutido na seção anterior, a porta analógica do Arduino faz a leitura da tensão sobre o resistor em série com o LDR e determinará a resistência deste pela Eq. (4). Com os valores numéricos dos

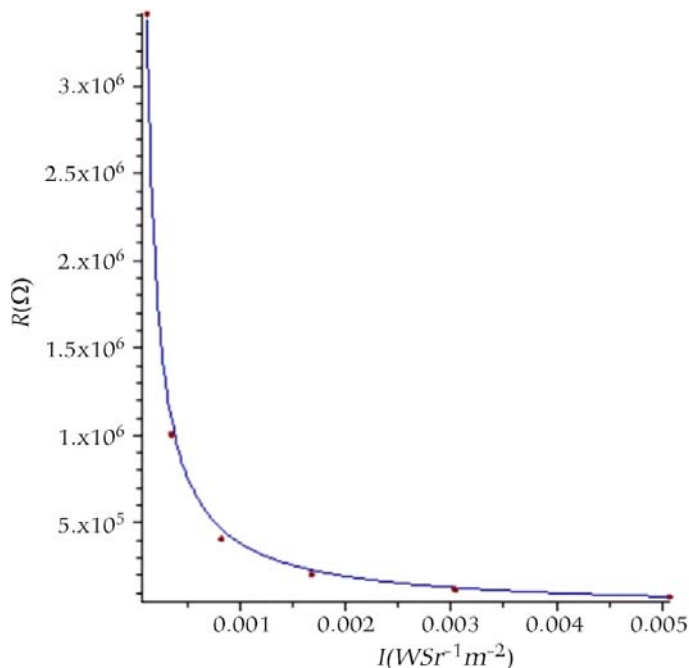


Figura 6: Ajuste não linear para a resistência elétrica do LDR em função da irradiância.

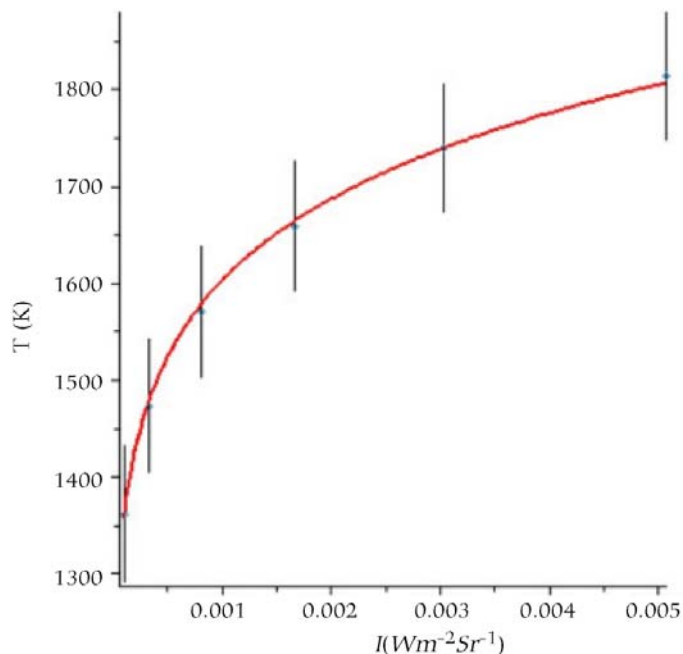


Figura 8: Ajuste não linear para a temperatura em função da irradiância.

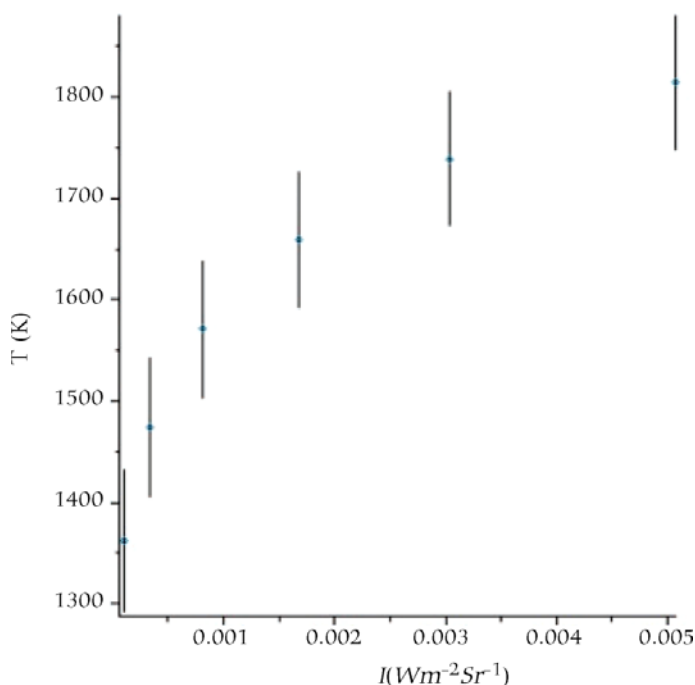


Figura 7: Gráfico de dispersão para os dados de temperatura e irradiância.

coeficientes das funções ajustadas, podemos implementar as Eqs. (16) e (17) no código-fonte do Arduino. Para aferir nosso instrumento podemos realizar dois procedimentos: medir a temperatura da lâmpada calibrada, submetendo-a a valores que não foram coletados para a calibração, e medir a temperatura de uma outra lâmpada incandescente. Os valores da temperatura da lâmpada calibradora e de outra lâmpada calculados por meio da

Eq. (7) e os resultados das medições estão expostos nas Tabelas 2-5.

Perceba que os valores medidos pelo instrumento, em conjunto com sua incerteza, estão dentro do intervalo definido pela incerteza dos valores previstos. Considerando que a Eq. (7) é a que nos forneceu a base para a calibração do instrumento, frente aos valores previstos pela mesma, podemos dizer que o instrumento possui uma boa exatidão.

Tabela 2: Temperaturas previstas e suas respectivas incertezas para a lâmpada calibradora.

$T_p$ ( $10^3$ K)	$\sigma_T$ ( $10^3$ K)
1,25394	0,041
1,31522	0,040
1,36574	0,040
1,41509	0,040
1,53031	0,039
1,60250	0,039

Tabela 3: Temperaturas medidas e suas respectivas incertezas para a lâmpada calibradora.

$T_M$ ( $10^3$ K)	$\sigma_T$ ( $10^3$ K)
1,26313	0,052
1,34337	0,052
1,44660	0,054
1,50622	0,054
1,55182	0,053
1,61790	0,053

Tabela 4: Temperaturas previstas e suas respectivas incertezas para a lâmpada não calibradora.

$T_p$ ( $10^3$ K)	$\sigma_T$ ( $10^3$ K)
1,25178	0,0068
1,34104	0,0073
1,45155	0,0081
1,51349	0,0088
1,55485	0,0093
1,61609	0,011



Tabela 5: Temperaturas medidas e suas respectivas incertezas para a lâmpada não calibradora.

$T_M$ ( $10^3$ K)	$\sigma_T$ ( $10^3$ K)
1,23146	0,0065
1,30876	0,0073
1,36546	0,0078
1,42387	0,0084
1,53586	0,010
1,60101	0,012

### Considerações finais

Como enfatizamos no início deste trabalho, poderíamos ter calibrado o instrumento apenas tomando os valores de temperatura e a leitura de tensão do Arduino.

Porém, o objetivo didático da construção do instrumento, tomando como agente motivador a automação usando a placa de desenvolvimento Arduino, foi proporcionar uma discussão mais aprofundada da função de Planck, que explica a radiação emitida por corpos em estado de incandescência, assim como dos processos estatísticos na estimativa das incertezas instrumentais. Nas vivências experimentais nos laboratórios didáticos de física é muito comum o aluno trabalhar com instrumentos analógicos e digitais cujas incertezas já são conhecidas e as propagar de suas medidas para a grandeza física de interesse. Entretanto, a importância do significado dessas incertezas quase sempre fica de lado e elas apenas são calculadas

porque isso faz parte da atividade proposta pelo professor. No processo de calibração de um instrumento, a necessidade da estimativa da incerteza das medidas feita por este fica mais clara e, desse modo, o cuidado de não superestimar ou subestimar faz com que o aluno procure executar os processos estatísticos de forma mais consciente. Esperamos, então, que a iniciativa aqui proposta seja uma opção viável para a ausência ou deficiência de laboratórios de física nas escolas de Educação Básica, possibilitando o que é preconizado pelos PCNs, haja vista que é indispensável que a experimentação esteja sempre presente ao longo de todo o processo de desenvolvimento das competências em física [9].

### Referências

- [1] M.A. Cavalcante, C.R.C. Tavoraro e E. Molisani, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **33**, 4503 (2011).
- [2] R. Eiseberg e R. Resnick, *Física Quântica* (Editora Campus, Rio de Janeiro, 1994).
- [3] D.P. Witt and G.D. Nutter, *Theory and Practice of Radiation Thermometry* (Editora Jhon Wiley Sons, New York, 1998).
- [4] J.H. Vuolo, *Fundamentos da Teoria de Erros* (Editora Edgard Blücher LTDA, São Paulo, 1995).
- [5] J.R. Taylor, *Introdução à Análise de Erros - O Estudo de Incertezas em Medições Físicas* (Editora Bookman, Porto Alegre, 2012).
- [6] P.D. Desai, *et al.*, *Phys. Chem. Ref. Data* **13**, 1069 (1984).
- [7] W.E. Forsythe and A.G. Worthing, *Astrophys. J.* **61**, 146 (1925).
- [8] M.A. Cavalcante e R. Haag, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **27**, 324 (2005).
- [9] BRASIL, Ministério da Educação, Secretaria de Educação Média e Tecnológica. Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN+): ensino médio. Brasília: Ministério da Educação, 2013.

### Endereços de Internet

<http://www.sunrom.com/p/ldr-5mmlight-dependent-resistor>.

## Caminhos Termométricos

# Ensino de termologia com aplicação do jogo “Caminhos Termométricos”



Joisilany Santos dos Reis\*,  
Victoria Cristina Moraes Oliveira,  
Aline Mariane Alves de Amorim,  
Bianca Martins Santos  
Universidade Federal do Acre, Campus  
Universitário, Rio Branco, AC, Brasil  
\*E-mail: joisy.santos15@hotmail.com

### Introdução

Grande parte dos alunos tem dificuldades em compreender assuntos que envolvam conceitos de física, pelo fato da forte necessidade de abstração e cognição aguçada. Com base nisso, buscou-se uma alternativa para atrair a atenção e melhorar a assimilação por parte dos alunos aos conteúdos estudados em física. Para isso, o presente artigo propõe a utilização do jogo de tabuleiro “Caminhos Termométricos”, com objetivo de proporcionar um ambiente lúdico em sala de aula, que desperte o interesse dos discentes para os conteúdos relacionados das aulas de termometria. Segundo Lopes [1],

“É muito mais eficiente aprender por meio de jogos e, isso é válido para todas as idades, desde o maternal até a fase adulta. O jogo em si, possui componentes do cotidiano e o envolvimento desperta o interesse do aprendiz, que se torna sujeito ativo do processo, e a confecção dos próprios jogos é ainda muito mais emocionante do que apenas jogar.”

Geralmente, notam-se grandes desafios para com as turmas de Ensino Médio composto tanto por jovens quanto por adultos, principalmente no que diz respeito ao ensino e aprendizagem da componente curricular de física, por inúmeros motivos. Dentre os quais podemos destacar: trabalhar e estudar ao mesmo tempo, estarem muitos anos fora da escola, entre outros. Vale salientar que o uso de jogos representam recursos facilitadores para o aprendizado [2], criando um ambiente agradável com aulas dinamizadas [3].

Neste contexto, para fomentar aulas diferenciadas e agradáveis, muitos professores usam experimentos. Entretanto, se o docente propõe dinamizar as aulas com o uso de experimento referente aos conceitos físicos, e esta ação não promover a participação de forma legítima dos alunos, o experimento que deveria ser interativo, torna-se apenas mais uma aula expositiva. Ao refletir sobre como inserir os estudantes ativamente nas aulas, o uso de jogos representa uma promissora ferramenta de aprendizagem, ampliando o leque de recursos didáticos que podem ser utilizados pelo professor, pois assim como Shulman [4] afirma,

“Para que o aluno aprenda, não basta que o professor domine o conteúdo específico da disciplina, mas é necessário que ele tenha sólidos conhecimentos de didática, de psicologia da educação, de currículo e que domine a pedagogia específica para ensinar física”.

Observe que um jogo bem elaborado, que contrabalance o aspecto lúdico e o pedagógico, que apresenta “um equilíbrio coerente entre diversão e aprendizado de modo a evitar que um prejudique o outro” [5], pode ter um potencial didático alcançado com maior facilidade. De maneira geral, os jogos são importantes recursos para as aulas de física, no sentido de servir como um instrumento facilitador da aprendizagem mediante a participação dos estudantes. Além disso, Cunha afirma

que os jogos permitem experiências importantes não só no campo do conhecimento, mas desenvolvem diferentes habilidades especialmente no campo afetivo e no social do estudante [6]. Essas habilidades também se estendem ao

**“Caminhos Termométricos” é um jogo de tabuleiro que tem por objetivo proporcionar um ambiente lúdico em sala de aula, que desperte o interesse dos discentes para os conteúdos relacionados à termometria**

O presente trabalho compartilha uma experiência didática realizada com estudantes do Ensino Médio da escola pública Dr. Santiago Dantas em Rio Branco-AC, ministrada por bolsistas do Programa Institucional de Iniciação à Docência (PIBID) do curso de Licenciatura em Física, da Universidade Federal do Acre (UFAC), durante uma atividade de extensão. O Jogo “Caminhos Termométricos” foi elaborado com o intuito de auxiliar a abordagem do conteúdo de termometria, especificamente sobre as transformações de escalas de temperatura, a fim de despertar o interesse dos estudantes. A atividade foi aplicada dentro de uma sequência didática que inclui: (1) Apresentação dos conteúdos introdutórios sobre temperatura e calor; (2) Discussão do assunto com exemplos práticos; (3) Resolução de questões de edições anteriores do Exame Nacional do Ensino Médio (ENEM); (4) Apresentação das escalas termométricas e suas transformações; (5) Realização do jogo de tabuleiro “Caminhos Termométricos”; (6) Aplicação do questionário. Os resultados mostraram ser possível inovar no formato de ensinar física, inserindo os alunos de forma ativa no processo ensino-aprendizagem, já que o jogo motivou os mesmos a participarem efetivamente da aula. O lúdico despertou a curiosidade dos alunos em interagirem entre si, estimulando a resolução das questões contidas no jogo e o trabalho em equipe.

campo docente, na premissa de que o professor é o principal mediador dentro desse interativíssimo, deixado muitas vezes o termo técnico “docente” de lado para ser supervisor, juiz do tabuleiro, auxiliador dentre outras funções e papéis que o mesmo pode assumir. Veja o que afirma Cunha [7],

“O aspecto de coerência pode ser verificado por meio da testagem prévia do jogo. É importante que o professor o experimente antes de levá-lo à sala de aula, ou seja, que ele vivencie a atividade de jogar. O professor deve desenvolver a atividade como se fosse o estudante, pois somente assim será possível perceber os aspectos de: coerência das regras, nível de dificuldade, conceitos que podem ser explorados durante e após o seu desenvolvimento, bem como o tempo e o material necessário para sua realização.”

O professor ainda precisa saber lidar com o barulho que o jogo pode vir a causar e às vezes quando não controlado pode vir a ser mais um problema do que uma solução. Neste ponto vale ressaltar o que afirma Silva [8],

“É claro que, quando usamos o jogo na sala de aula, o barulho é inevitável, pois só através de discussões é possível chegar-se a resultados convincentes. É preciso encarar esse barulho de uma forma construtiva; sem ele, dificilmente, há clima ou motivação para o jogo. É importante o hábito do trabalho em grupo, uma vez que o barulho diminui se os alunos estiverem acostumados a se organizar em equipes. Por meio do diálogo, com trocas de componentes das equipes e, principalmente, enfatizando a importância das opiniões contrárias para descobertas de estratégias vencedoras, conseguimos resultados positivos. Vale ressaltar que o sucesso não é imediato e o professor deve ter paciência para colher os frutos desse trabalho.”

Em linhas gerais, os jogos educacionais são estratégias lúdicas, motivacionais e interativas de ensino, ou seja, eles visam fazer com que os alunos através do jogo aprendam se divertindo, de modo a despertar a atenção dos mesmos para os assuntos abordados no decorrer do currículo escolar, proporcionando consequentemente um maior rendimento no aprendizado. Observa-se que a ação de educação requer maior envolvimento do docente, para que o aluno desenvolva sua compreensão através de metodologias de ensino que despertem suas capacidades cogniti-

vas. É de suma importância que o professor seja capaz de inovar, assumindo a responsabilidade de gerar um interesse individual de cada aluno nas aulas. Nesta perspectiva, a referência [9] apresenta uma reflexão sobre a evolução dos jogos em física segundo a perspectiva do professor.

Com ênfase nisso, para tornar as aulas mais atraentes e melhorar o binômio ensino/aprendizagem, o presente trabalho propôs o jogo “Caminhos Termométricos” como recurso didático para o ensino de termometria, com foco nas operações de transformações de escalas termométricas. O jogo busca atrair a atenção dos estudantes para as aulas, visando interação do aluno de forma individual e coletiva, na construção do conhecimento, utilizando a rivalidade e a competição que o jogo proporciona como motivação para consolidar o raciocínio lógico e matemático envolvido nas operações de transformações de escalas de temperaturas. Além de propor o jogo, o presente trabalho descreve a utilização desta atividade em sala de aula, relatando a experiência de sua aplicação e os resultados animadores mediante tal ferramenta de ensino.

### Materiais e métodos

A metodologia do trabalho consiste na aplicação de uma sequência didática com alunos do terceiro ano de uma escola pública de Rio Branco-AC, que inclui utilização de um jogo de tabuleiro e ao final da atividade, a aplicação de um ques-

tionário investigativo. A presente atividade integra uma das ações de extensão do projeto “Ciências na escola: Experimentação e Teoria”, que reúne durante uma semana aulas de física, química e biologia planejada e ministrada por graduandos do curso de Licenciatura nas respectivas áreas, da Universidade Federal do Acre (UFAC). Tal projeto de extensão conta com a parceria entre universidade e escola de educação básica; para isso, as atividades foram realizadas no contraturno das aulas regulares do Ensino Médio. A presente prática também compõe uma das ações desenvolvidas

pelos bolsistas do Programa Institucional de Bolsa de Iniciação à Docência - PIBID/Física da UFAC.

A elaboração da aula e preparação dos materiais utilizados foi realizada com a orientação da coordenadora do PIBID/Física - UFAC. A primeira etapa de preparação da aula envolvia a escolha do tema, que por ter foco na preparação para o Exame Nacional do Ensino Médio (ENEM), optou-se por assuntos que foram cobrados com maior frequência em edições anteriores, neste caso, calor e temperatura. Diante da carência da escola, localizada em uma zona rural de difícil acesso, optou-se por elaborar um material didático que não estivesse diretamente ligado a aparelhos tecnológicos ou laboratórios de física de difícil acesso ou manuseio para o público alvo da atividade. Vale ressaltar que outros recursos podem ser utilizados e adequados para tal realidade, como por exemplo, a construção de um laboratório

**Os jogos educacionais são estratégias lúdicas, motivacionais e interativas de ensino, ou seja, eles visam fazer com que os alunos através do jogo aprendam se divertindo**

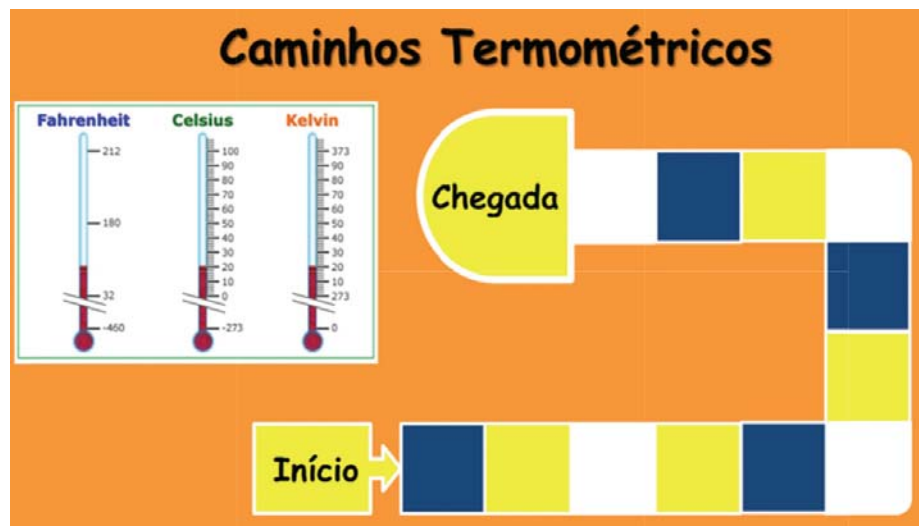


Figura 1: Jogo desenhado em plataforma digital como referência para a criação do manual.



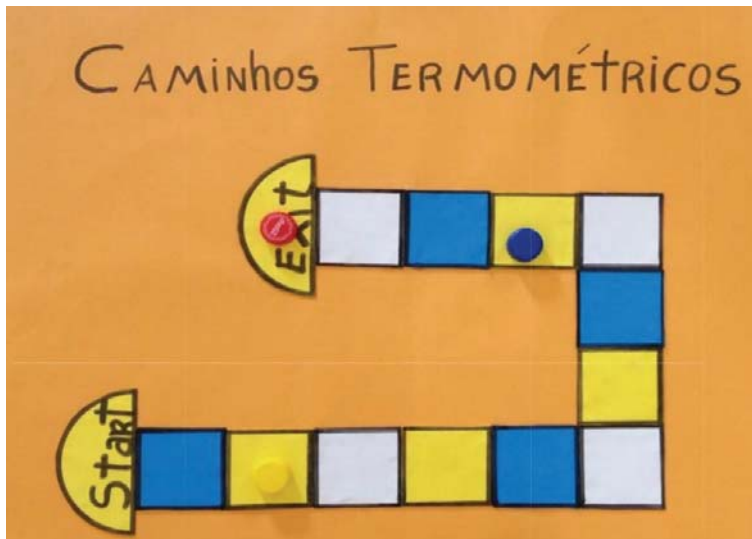


Figura 2: Jogo “Caminhos Termométricos”, montado com papel cartão, canetinha preta e EVA colorido para utilização em sala de aula.

de física de baixo custo, conforme descrito por Silva e Leal [10]. Entre as diversas possibilidades de recursos didáticos descritos na literatura para o professor da componente curricular de física, o cenário da inclusão ganha destaque na área, como o apresentado por Cordova e cols. [11].

Para a presente atividade, o jogo de tabuleiro idealizado, intitulado de “Caminhos Termométricos”, segue apresentado na Fig. 1. Entretanto, uma versão com materiais de baixo custo também pode ser utilizada, veja a Fig. 2.

Para elaboração do tabuleiro (Fig. 2) utiliza-se materiais simples, como: cartolina; cola quente; tesouras; papel cartão; canetinha preta, EVA colorido e tampa de garrafa PET. Com tais materiais, um dado de seis lados também pode ser construído. Além desses elementos, o jogo dispõe de três pilhas de cartas (azul, branco e amarelo) com perguntas sobre transformações em escalas de temperatura, veja a Fig. 3.

As regras do jogo são detalhadas a seguir. O jogo foi proposto para três jogadores ou três equipes representadas por três tampas coloridas de garrafas PET, como mostra a Fig. 2. Podendo ser adaptado para mais jogadores; neste caso, deve-se aumentar o número de cartas-perguntas. A divisão das equipes e a escolha de quem começa a jogar fica a critério dos jogadores ou do professor. Para iniciar o jogo, a primeira equipe joga o dado e anda o número de casas que saiu no dado, consequentemente a cor da casa que a respectiva peça alcançar, indica a cor da pilha de cartas que os jogadores terão que retirar uma carta e responder à pergunta contida nela. Vale ressaltar que todas as cartas apresentavam desafios com transformações de escalas, por exemplo: Quanto

equivale  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  (graus Celsius) em K (Kelvin)?

Para responder a pergunta o aluno poderia calcular esta operação usando: a fórmula de transformação entre as escalas; ou uma regra de proporcionalidade entre os intervalos de temperatura das escalas a serem consideradas, ou seja, comparando os intervalos de temperatura da questão. Cada grupo disponibilizava de 2 minutos no máximo para responder a pergunta corretamente. Se o grupo ou equipe que estivesse na vez de responder acertasse a pergunta, ele permanecia na casa, caso contrário, se errasse a pergunta, voltava todas as casas que andou nessa rodada. Vale mencionar que algumas cartas apresentavam prêmios extras, como exemplo: ao acertar, avance duas casas, caso contrário volte duas casas. Nesse caso, o jogador atenderia como premiação ou punição, pelo acerto ou erro, respectivamente, o que a carta determinava.

Quanto vale $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ em $^{\circ}\text{F}$ ?	Quanto vale $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ em $^{\circ}\text{F}$ ?	Quanto vale $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ em $^{\circ}\text{F}$ ? Se errou volte ao início do jogo	Quanto vale $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ em $^{\circ}\text{F}$ ?	Quanto vale $100\text{ }^{\circ}\text{K}$ em $^{\circ}\text{C}$ ?	Quanto vale $15\text{ }^{\circ}\text{K}$ em $^{\circ}\text{C}$ ?
Quanto vale $25\text{ }^{\circ}\text{F}$ em $^{\circ}\text{C}$ ?	Quanto vale $60\text{ }^{\circ}\text{F}$ em $^{\circ}\text{C}$ ?	Quanto vale $392\text{ }^{\circ}\text{F}$ em $^{\circ}\text{C}$ ? Se acertou avance 2 casa, caso contrário volte 2 casa	Quanto vale $40\text{ }^{\circ}\text{F}$ em $^{\circ}\text{C}$ ?	Quanto vale $0\text{ }^{\circ}\text{K}$ em $^{\circ}\text{C}$ ? Se acertou permaneça na casa	Quanto vale $27\text{ }^{\circ}\text{F}$ em $^{\circ}\text{C}$ ?

Figura 3: Cartas usadas no tabuleiro do jogo.

Quando o jogador ou equipe que estiver na vez errar a resposta da questão, este retorna as casas que andou na rodada; e os outros grupos têm a chance de dar a resposta correta, motivando assim a participação de todos os alunos para responder todas as questões sorteadas em cada rodada. Lembrando que em cada rodada, são sorteadas três perguntas, correspondendo ao número total de jogadores. Ocorrendo de uma das equipes ou ambas as equipes acertarem a pergunta, estes andam o número de casas sorteadas no dado pelo grupo que estava na vez de responder. O objetivo do jogo é chegar ao final do caminho o mais rapidamente possível, assim quanto mais ágil o jogador ou equipe calcular as transformações entre as escalas, maiores as chances de ganhar o jogo.

É com referências e jogos assim que Fortuna ressalta [12]: “Enquanto joga o aluno desenvolve a iniciativa, a imaginação, o raciocínio, a memória, a atenção, a curiosidade e o interesse, concentrando-se por longo tempo em uma atividade.”

O jogo “Caminhos Termométricos” foi aplicado durante a atividade de extensão realizado na escola Dr. Santiago Dantas, na zona rural de Rio Branco, com alunos do terceiro ano do Ensino Médio. A aula ministrada seguia a sequência didática apresentada no Quadro 1. Vale ressaltar que por ser uma atividade de extensão, estava voltada para fazer uma revisão dos conteúdos de física sobre temperatura e calor.

A primeira etapa da sequência didática foi fundamentada em apresentar aos alunos os conceitos físicos de temperatura e calor com aula teórica, expositiva e dialogada. A segunda etapa apresentou uma discussão sobre os assuntos com exemplos práticos. Em seguida, algumas questões propostas com embasamento na explicação anterior foram resolvidas junto com

Quadro 1: Sequência didática.

Etapa	Descrição da sequência didática
1°	Apresentação dos conteúdos introdutórios de temperatura e calor;
2°	Discussão do assunto com exemplos práticos;
3°	Resolução de questões de edições anteriores do ENEM;
4°	Apresentação das escalas termométricas e suas transformações;
5°	Realização do jogo de tabuleiro Caminhos Termométricos;
6°	Aplicação de um questionário para coleta de dados sobre a atividade.



Figura 4: Momento de explicação sobre as regras do jogo e objetivos.

os alunos, como proposta de preparação para o ENEM. Como quarta etapa, a explicação sobre as escalas termométricas e suas transformações foram abordadas, bem como os cálculos que o sucedem. Em consonância, aplicou-se o jogo, que também pôde ser usado como meio de avaliação se os estudantes aprenderam a calcular as transformações de escalas de temperatura. Por fim, a última etapa consistiu na aplicação do questionário, onde os alunos relataram suas opiniões sobre o uso do jogo durante a aula.

Na oportunidade, as regras e os direcionamentos foram passados aos estudantes, que divididos em três grupos se posicionaram ao redor da sala de aula, e o tabuleiro foi colocado no centro da classe, onde ficasse ampliado a visualização para todos os grupos, Fig. 4.

Ao final da atividade, o questionário foi aplicado, os dados computados e apresentados a seguir. O total de alunos que participaram da atividade foram 21.

Ao se tratar da competitividade, ou até mesmo das regras impostas pelo jogo, surge o questionamento da divisão dos alunos entre si, ou da forma como podem reagir com a perda, entretanto, a visão de Brougère [13] estabelece que:

“Mesmo as regras chegando prontas aos alunos, estes têm a liberdade e a flexibilidade de aceitar, modificar ou simplesmente ignorá-las. Isto pode depender do contexto no qual o aluno estará inserido e dos parceiros dos jogos. O objetivo final de uma criança

perante um jogo é a vitória sobre o oponente, entretanto, mesmo que o aluno não vença, o prazer usufruído durante o jogo pode fazer com que a criança retorne a jogar.”

### Resultados e discussões

Os resultados aqui apresentados estão baseados nas observações durante a aplicação do jogo e das respostas fornecidas pelos estudantes ao questionário. Na Fig. 5 estão apresentados momentos da aplicação da sequência didática, como a explicação das regras do jogo e suas funcionalidades.

No decorrer do jogo, notou-se que a maioria dos alunos apresentaram grandes dificuldades nas operações matemáticas, muitos conseguiam montar a relação de equivalência exigida para regra de proporcionalidade entre os intervalos de temperatura das escalas, mas no momento de efetuar passagens algébricas para chegar ao resultado, constatou-se um grande

desafio para eles. Mediante tal dificuldade, a primeira rodada foi realizada com ajuda do professor, onde os estudantes dispuseram da oportunidade de treinar a operação e sanar as dúvidas. A partir da segunda rodada, foi cronometrado o tempo de dois minutos aos estudantes para responder cada questão. Neste momento, foi possível observar que a operação de transformação de escala ocorreu de forma mais rápida, dentro do tempo estipulado e com resultados corretos. Entretanto, algumas questões bem simples de raciocínio lógico, onde os estudantes poderiam dar as respostas sem realizar contas, ainda constatou-se em alguns a necessidade do uso do tempo total disponível para encontrar a resposta.

Analisando as dificuldades particulares da área, identificou-se um grande déficit dos alunos com relação a cálculos básicos de matemática, como isolar as incógnitas ou a resolução de equações de primeiro grau, domínio necessário para execução do jogo. Felizmente o conceito físico sobre os fenômenos pareceu bastante promissor, contando que os alunos não apresentaram dificuldade quanto à compreensão do conteúdo. Vale mencionar que apesar de muitos professores ainda não enxergarem o jogo lúdico como uma forma alternativa de alcançar melhores resultados, verificou-se que este propicia uma ampla visão das principais dificuldades encontradas pelos alunos ao longo da atividade possibilitando a avaliação do nível de aprendizado da turma por parte do professor.

Um aspecto importante para incrementar as discussões sobre o jogo “Caminhos Termométricos” é o registro das experiências dos alunos para análise posterior, para tanto, elaborou-se um questionário com duas perguntas sobre a aula e o jogo. A primeira pergunta indagava os alunos o que eles acharam da aula. Entre as opções de respostas, os estudantes poderiam marcar: Ótima, Boa, Regular ou Ruim. Os resultados mostram que 89,9% dos entrevistados afirmaram que a aula foi ótima e 10,1% que foi boa.



Figura 5: Aplicação da sequência didática.

## Quadro 2: Justificativa dos entrevistados à segunda pergunta do questionário.

Questão: Você acha que o uso do jogo de tabuleiro para as transformações de escalas de temperatura, ajudaram você a compreender o conteúdo de forma mais fácil? Justificativa dos alunos que responderam concordo.

Aluno 1: “Se tivesse aulas assim todos os dias, eu seria apaixonada pela física”.

Aluno 2: “Se eu soubesse que o assunto era tão fácil, teria aprendido antes.”

Aluno 3: “O jogo de tabuleiro tornou a aula mais divertida e assim possibilitou a compreensão mais fácil.”

Aluno 4: “O jogo de tabuleiro para as transformações de escalas de temperatura ajudou a compreensão de forma mais fácil pois o jogo exige uma rapidez na hora de calcular, facilitando a nossa lógica.”

Aluno 5: “Através de jogos práticos como esses aprendemos bem mais.”

O interessante é que nenhum dos entrevistados marcaram as opções regular ou ruim demonstrando que a atividade teve boa aceitação entre os alunos.

A segunda pergunta questionava se os alunos acharam que o uso do jogo de tabuleiro para as transformações de escalas de temperatura ajudou na compreensão do conteúdo de forma mais facilitada. Como opção de resposta, os estudantes poderiam marcar: Concordo totalmente; Concordo; Concordo em parte; Discordo; e Discordo totalmente.

Para tal questionamento, todos os alunos afirmaram concordo. A pergunta investigava ainda exigia uma justificativa. Observou-se que tais respostas estão relacionadas ao dinamismo que o jogo deu a aula, como pode ser visualizado no Quadro 2, que apresenta algumas das respos-

tas dos entrevistados.

Verifica-se que o jogo mostrou aos estudantes uma nova visão sobre a física desmistificando o conceito de uma física “temida” e “odiada”. Aponta-se ainda a importância da utilização de recursos didáticos onde os estudantes participem ativamente das aulas, como exemplo: jogos lúdicos e aulas experimentais, bem como ferramentas de ensino que viabilizem o processo de ensino/aprendizagem em física de forma efetiva e inovadora.

### Conclusões

Buscando novas maneiras de ensino por meio do lúdico, o presente trabalho propõe e apresenta resultados para aplicação do jogo “Caminhos Termométricos” em uma turma de terceiro ano do Ensino Médio. Com base nos resultados, verifi-

cou-se que o jogo proporciona uma maior interação entre os alunos e aprendizagem em grupo, que auxilia em interesses e necessidades particulares da classe. Cabe ressaltar que uma atividade lúdica não é apenas a somatória de ações, é antes de tudo, uma maneira de ser, de estar, de pensar, de encarar o ensino e de relacionar-se com o aluno. É preciso conhecer a realidade do estudante, o seu contexto, seus costumes, para que a partir de então o professor possa elaborar o jogo e jogar com ele. Quanto mais recursos pedagógicos diferenciados forem proporcionados no ambiente de sala de aula, mais alegre, espontâneo, criativo, autônomo e efetivo a aprendizagem será.

A atividade também comprovou que o jogo de tabuleiro auxiliou e motivou os alunos, facilitando a compreensão dos assuntos físicos e a minimização das dificuldades nas operações matemáticas, o que tornou a aula mais interativa e atraente culminando para a sua aprendizagem. Desenvolvendo o cognitivo dos estudantes, o raciocínio lógico, alcançando a avaliação de que a atividade alcançou seu objetivo de maneira satisfatória, despertando o aluno a participar de forma ativa da aula. Destaca-se ainda que o jogo proposto possa ser adaptado para outros conteúdos de física, com alterações nas regras sempre que necessário, demonstrando ser um recurso promissor com resultados animadores.

### Referências

- [1] M.G. Lopes, *Jogos na Educação: Criar, Fazer e Jogar* (Cortez, São Paulo, 2001), 4ª ed, p. 23.
- [2] L. Alves e M.A. Bianchin, *Rev. Psicopedagogia* **27**, 282 (2010).
- [3] Santa Marli Pires dos Santos, *O Lúdico na Formação do Educador* (Vozes, Petrópolis, 1997), 6ª ed.
- [4] L. Shulman, *Harvard Educational Review*, p. 5, 1987.
- [5] R.F. Pereira, P.A. Fusinato, e M.C.D. Neves, in: *VII Encontro De Nacional De Pesquisa Em Educação Em Ciências*, Florianópolis, 8 de Novembro de 2009.
- [6] M.B. Cunha, *Jogos Didáticos de Química. Edição Única* (Grafos, Santa Maria, 2000).
- [7] M.B. Da Cunha, *Química Nova na Escola* **34**, 92 (2012).
- [8] A.F. Da Silva, e H.M.Y. Kodama, in: *II Bial da Sociedade Brasileira de Matemática*, UFBA, 25 a 29 de Outubro, p. 1-19, 2004.
- [9] M.C. Ferreira e L.M.O. Carvalho, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **26**, 57 (2004).
- [10] J.C.X. Silva e C.E.S. Leal, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **39**, e1401 (2017).
- [11] H.P. Cordova, C.E. Aguiar, H.S. Amorim, K.S.O.M. Sathler e A.C.F. Santos, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **40**, e2505, 2018.
- [12] T.R. Fortuna, *Revista do Professor* **19**(75), 15 (2003).
- [13] Gilles Brougere, *Jogo e Educação*, tradução Patrícia Chittoni Ramos (Artes Médicas, Porto Alegre, 1998), 1 ed. 218 p.





Kamilla Nunes Fonseca<sup>1.#</sup>,  
Júlio César Lemos Milli<sup>2</sup>,  
Manuela Gomes Bomfim<sup>3</sup>,  
Eliane dos Santos Almeida<sup>4</sup>,  
Cleilde Aguiar Neres<sup>5</sup>,  
Simoni Tormohlen Gehlen<sup>6</sup>

Universidade Estadual de Santa Cruz,  
Ilhéus, Bahia, Brasil

<sup>1</sup>E-mail: mila\_nunesf@hotmail.com

<sup>2</sup>E-mail: juliocesarmilli@hotmail.com

<sup>3</sup>E-mail: manuelag.bomfim@gmail.com

<sup>4</sup>E-mail: elyhts@gmail.com

<sup>5</sup>E-mail: cleu.aguiar@hotmail.com

<sup>6</sup>E-mail: stgehlen@gmail.com

## Introdução

Algumas propostas de reorientação curricular, apoiadas na perspectiva educacional de Paulo Freire, têm sido discutidas no âmbito do ensino de física e no ensino de ciências, com o intuito de estruturar um currículo pautado na realidade dos educandos para a transformação social e humanização dos sujeitos [1-3]. Essas discussões perpassam diversos níveis de ensino e podem auxiliar os educadores com novas perspectivas, nas quais se chama a atenção para os estudos que têm como foco a reorganização curricular do Ensino Fundamental, a exemplo das propostas de Solino e Gehlen [4,5], Novais [6] e Fonseca [7], que elaboraram um conjunto de aulas na perspectiva da educação freireana, tendo como referência um tema gerador.

A educação freireana tem como pressupostos básicos a dialogicidade e a problematização das questões sociais vivenciadas pelos sujeitos, visando à compreensão dos problemas que os afligem, bem como a superação da visão ingênua que podem vir a ter sobre a realidade em que estão inseridos. Para o educador, em sua jornada de trabalho, desvelar a realidade não é algo simples, mas pode se tornar possível por intermédio de conteúdos e conceitos científicos e da discussão de valores que direcionam o rumo da sociedade. Tais conhecimentos e ações devem criar condições para que os sujeitos se posicionem com responsabilidade mediante os problemas e questões sociais.

Apontadas tais possibilidades, ressalta-se a necessidade do planejamento da prática pedagógica que, para Freire [8], necessita ocorrer por meio de questionamentos realizados pelo educador em torno

do que irá dialogar com os educandos, antes que educadores e educandos se encontrem em sala de aula. O “educador-bancário” não possui essa inquietação, pois em sua prática pedagógica a dialogicidade não se faz presente. Para o educador dialógico e problematizador, defendido por Freire, o conteúdo programático não é imposto aos educandos, mas sistematizado com eles para a compreensão e superação de suas reais necessidades [8]. Pensar dessa forma exige que o educador esteja disposto a mudar a sua prática, o que se inicia por meio de um olhar crítico sobre si e sobre a realidade social de seus educandos.

Partindo desse pressuposto, Freire [8] apresenta a esses educadores o processo de investigação temática, que tem como foco o desvelamento da realidade dos sujeitos, com vista à superação das situações-limite, que podem ser entendidas como visões distorcidas de mundo. Nesse sentido, o sujeito que vivencia uma situação-limite não percebe os problemas nos quais está inserido, tampouco reconhece

**Para o educador dialógico e problematizador, defendido por Freire, o conteúdo programático não é imposto aos educandos, mas sistematizado com eles para a compreensão e superação de suas reais necessidades**

encaminhamentos ou soluções para superar sua realidade. Esse processo de investigação foi sistematizado por Delizoicov [1] para o contexto da educação formal, uma vez que o mesmo não

estava orientado para o desenvolvimento em espaços institucionalizados, como a sala aula.

Desde a reestruturação das etapas da Investigação Temática por Delizoicov [1], tal processo vem sendo estudado por diversos pesquisadores que têm apresentando releituras e aprofundamentos teóricos e metodológicos [9]. Por exemplo, o estudo de Sousa e cols. [10], ao desenvolver um processo de formação de educadores, compreendeu as etapas da seguinte forma: 1) aproximações iniciais

O trabalho apresenta uma proposta de ensino de física a partir do tema gerador “As condições da feira nossa de cada dia: bairro de Fátima, Itabuna/BA”, que foi obtido por meio da Investigação Temática, baseado na perspectiva de Paulo Freire, realizado no contexto de um processo formativo de educadores de uma escola da educação básica do município de Itabuna/BA. A investigação temática ocorreu em quatro etapas, quais sejam: i) aproximações iniciais com a comunidade local e escolar; ii) apresentação de possíveis situações-limite para a comunidade local; iii) legitimação da hipótese e iv) organização da programação curricular. Para este trabalho, o foco é a última etapa, com destaque para o planejamento e elaboração das aulas de física, desenvolvidas em conjunto com as educadoras participantes do processo formativo, com o objetivo de superar a compreensão limitada sobre o armazenamento e conservação da carne vendida na feira. Nesse contexto, os conteúdos de física abordados de forma interdisciplinar com a biologia e a química foram fundamentais para a compreensão dessa situação-limite, além de possibilitar uma educação dialógica e emancipadora ao promover um ensino de ciências/física contextualizado e significativo para a comunidade escolar.

com a comunidade local e escolar: permite aos investigadores obterem as impressões que os sujeitos apresentam sobre a realidade em que estão inseridos; 2) apresentação de situações-problema para a comunidade local: consiste na apresentação de possíveis situações-limite para a comunidade local, por meio de representações dessas situações e problematizações com a comunidade; 3) legitimação da hipótese: nessa etapa, as situações-limite são legitimadas com a comunidade e obtêm-se o tema gerador, e 4) organização da programação curricular: aqui ocorre a elaboração das atividades para a sala de aula, em que são selecionados os conteúdos e ações necessários para a compreensão do tema gerador.

Nesse contexto, o Grupo de Estudos em Abordagem Temática no Ensino de Ciências (GEATEC), vinculado à Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC), tem buscado contribuir com a formação de educadores da Educação Básica, na região da Costa do Cacau, Sul da Bahia. O grupo realiza processos educativos e auxilia na elaboração de atividades didático-pedagógicas para os diversos níveis do ensino de ciências, à luz da perspectiva educacional freireana. Dentre os processos educativos realizados pelo GEATEC, destaca-se um curso de formação de educadores dos anos iniciais do Ensino Fundamental I, em uma escola municipal de Itabuna - BA, em que a partir da obtenção de um tema gerador realizou-se a estruturação da programação curricular com a inserção de alguns conteúdos e conceitos de ciências. Assim, o presente trabalho tem como objetivo explicitar aspectos do processo de obtenção do tema gerador e da organização de uma possível programação curricular para o Ensino Fundamental, em que se destacam relações de conceitos da física com outras áreas do conhecimento, a exemplo da química e da biologia.

### **A obtenção do tema gerador no bairro de Fátima**

Para a obtenção do tema gerador, foi realizado pelo GEATEC<sup>1</sup> um processo formativo com quatro educadoras que atuam nos anos iniciais do Ensino Fundamental I, em uma escola municipal localizada em Itabuna/BA, bairro de Fátima. Ocorreu durante o período de novembro de 2015 a fevereiro de 2016, totalizando sete encontros, com uma

carga horária de 40 horas. No curso foi realizado o processo de investigação temática com o objetivo de propiciar um ensino de ciências contextualizado e significativo para os educandos, baseado nas etapas propostas Sousa e cols. [10], as quais foram organizadas da seguinte forma:

- i) Aproximações iniciais com a comunidade local e escolar: foi realizada pela equipe do GEATEC por meio de um levantamento de informações (reportagens, imagens, notícias, etc.) em sites e blogs regionais acerca da comunidade, bem como conversas com moradores sobre as possíveis problemáticas vivenciadas no bairro. Com base nessas informações, o GEATEC elaborou o

**O presente trabalho tem como objetivo explicitar aspectos do processo de obtenção do tema gerador e da organização de uma possível programação curricular para o Ensino Fundamental, em que se destacam relações de conceitos da física com outras áreas do conhecimento, a exemplo da química e da biologia**

vídeo *Um olhar sobre o bairro de Fátima*, sintetizando as problemáticas sociais que o grupo identificou na comunidade, a exemplo do lixo espalhado pelas ruas, a falta de saneamento básico, a violência e as condições precárias da feira livre do bairro.

- ii) Apresentação de possíveis situações-limite para a comunidade local: a partir da problematização do vídeo *Um olhar sobre o bairro de Fátima*, a equipe do GEATEC apresentou às educadoras as imagens e falas obtidas na primeira etapa. Essas informações foram agrupadas pelas educadoras, tendo por referência aos principais problemas identificados no bairro. Os grupos de informações foram transpostos para um portfólio e apresentados à comunidade com o intuito de se identificar a compreensão que os moradores têm sobre os problemas locais.
- iii) Legitimação da hipótese: as falas obtidas a partir da apresentação do portfólio aos moradores foram acrescentadas ao mesmo e posteriormente problematizadas com as educadoras que, juntamente com os integrantes do GEATEC, legitimaram algumas situações-limite, dentre elas: a falta de criticidade com relação ao descarte inadequado do lixo; a compreensão limitada do armazenamento dos alimentos vendidos na feira; a concepção de que os problemas são naturais, a transferência de responsabilidade da resolução de problemas da feira para o poder público etc. Essas

situações configuraram-se no tema gerador "As condições da feira nossa de cada dia do bairro de Fátima, Itabuna/BA".

- iv) Organização da programação curricular: com base no tema gerador, foram selecionados conteúdos, conhecimentos científicos e ações necessários para a superação das situações-limite. Para tal, foram organizadas unidades de ensino e o planejamento das aulas, as quais foram estruturadas pelos Três Momentos Pedagógicos [11]. A complexidade das situações-limite exigiu que algumas das aulas contemplassem conteúdos de física articulados com a química e biologia, as quais foram elaboradas para o contexto do Ensino Fundamental.

### **As unidades de ensino e a contribuição da física**

Os problemas encontrados na feira do bairro de Fátima, tais como: a infraestrutura da feira, a presença de animais naquele espaço e a forma como os alimentos são comercializados, são considerados prejudiciais à saúde dos moradores e ao meio ambiente e, por isso, necessitavam ser problematizados e solucionados. Considerando a importância do desenvolvimento de uma educação que tenha como princípios a formação crítica do sujeito e o exercício da cidadania, as unidades foram organizadas tendo como foco o processo de conscientização dos educandos sobre o tema gerador, sendo então selecionadas quatro unidades de ensino, conforme exemplificado no Quadro 1.

De acordo com a estrutura das Unidades de Ensino, apresentadas no Quadro 1, alguns conteúdos e conceitos foram apontados – pelas educadoras que participaram do curso e pelos integrantes do GEATEC – como importantes para a compreensão do tema gerador e para a superação das situações-limite. Esses conteúdos e conceitos foram selecionados em função da complexidade do tema gerador e estão relacionados a diversas áreas do conhecimento, como história, geografia, sociologia, matemática, química, física e biologia. Como exemplo do papel da física nessas unidades, são destacadas no Quadro 2 a sua possível contribuição para a superação das situações-limite dos moradores do bairro de Fátima.

As contribuições da física apresentadas no Quadro 2 tornam evidente que a busca pela superação da visão acrítica com relação ao armazenamento e conservação dos alimentos da feira requer a articulação de outras áreas do conhecimento. Por

Quadro 1: Unidades de ensino elaboradas com base no tema gerador.

CONDIÇÕES DA FEIRA NOSSA DE CADA DIA: BAIRRO DE FÁTIMA, ITABUNA/BA			
			
<b>Unidade I – Espaço sociocultural da Feira</b>	<b>Unidade II – Qualidade dos alimentos e o lixo inadequado na feira</b>	<b>Unidade III – Animais na feira</b>	<b>Unidade IV – Possíveis Alternativas</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Origem histórica das feiras no Brasil;</li> <li>- Origem dos alimentos: de onde vêm e como são transportados até a feira;</li> <li>- Unidades de medida;</li> <li>- Agricultura familiar;</li> <li>- Infraestrutura da Feira: localização, esgoto a céu aberto, barracas de madeira;</li> <li>- Papel socioeconômico da feira: fonte de renda dos feirantes;</li> <li>- Papel cultural da feira: lazer e socialização.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Qualidade dos alimentos;</li> <li>- Decomposição dos alimentos: lixo orgânico e inorgânico;</li> <li>- Proliferação de microrganismos;</li> <li>- Temperatura e calor;</li> <li>- Formas de propagação de calor;</li> <li>- Higienização dos alimentos;</li> <li>- Doenças relacionadas ao consumo de alimentos contaminados;</li> <li>- Produção e descarte de lixo na feira: produção de resíduos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Doenças transmitidas por animais (leptospirose, infecções, náuseas, verminose);</li> <li>- Cadeia alimentar;</li> <li>- Classificação dos animais;</li> <li>- Habitat dos animais;</li> <li>- Animais comercializados na feira.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Trabalho colaborativo (cooperativas);</li> <li>- Compostagem;</li> <li>- Formas adequadas de armazenamento e conservação dos alimentos;</li> <li>- Higiene;</li> <li>- Recipientes térmicos;</li> <li>- Temperatura;</li> <li>- Trocas de calor;</li> <li>- Importância da feira.</li> </ul>

Fonte das imagens: Adaptado de Fonseca [7].

exemplo, por meio da física é possível explicar o aumento da temperatura da carne por conta da irradiação solar, porém a física não é capaz de explicar a relação do aumento da temperatura com a proliferação de microrganismos. Outro exemplo pode ser associado ao aumento da temperatura da carne pela irradiação solar, que quando associado à técnica da salga, responsável pelo aumento da pressão osmótica, auxilia na conservação da carne (carne de charque), ou seja, uma

relação entre a física e a química. Além desses exemplos, o problema da feira possui um caráter social, cultural e interdisciplinar, em que outros aspectos necessitam ser trabalhados, tais como: higiene dos alimentos, descarte adequado de resíduos, doenças referentes a alimentos contaminados e outras questões que evidentemente extrapolam o campo da física. Por conta disso, houve a necessidade de se planejar aulas que articulassem a física às demais áreas do conhecimento, como a

química e a biologia, as quais serão apresentadas no item a seguir.

### Os conceitos de física para a compreensão do tema gerador

Após serem identificados os conteúdos e conceitos científicos necessários para compreensão do tema gerador, foram elaboradas, em parceria com as educadoras, as atividades didático-pedagógicas. Essas aulas seguiram a dinâmica dos Três Momentos Pedagógicos [11], quais sejam: *Problemática Inicial (PI)* – são problematizadas questões ou situações do contexto de vida dos educandos e que estão contidas no tema gerador; *Organização do Conhecimento (OC)* – o educador trabalha os conteúdos e conceitos científicos necessários à compreensão da problemática inicial; *Aplicação do Conhecimento (AC)* – o educador retoma as questões realizadas na Problemática Inicial, respondendo com base nos conhecimentos científicos abordados na Organização do Conhecimento, bem como apresenta outras situações.

As atividades didático-pedagógicas apresentadas no Quadro 3 são um recorte do plano de ensino elaborado com as educadoras dos anos iniciais durante o processo formativo. Foram selecionados dois planos de aulas, os quais se pautam na necessidade de articulações entre a física e a biologia e a física e a química, para a compreensão e superação de algumas das contradições que legitimam o tema. Como exemplo, apresenta-se o plano de aula I (Quadro 3) que foi elaborado tendo como foco conceitos de física e biologia com o objetivo de destacar a importância da refrigeração dos alimentos vendidos na

Quadro 2: Os conteúdos de física nas unidades de ensino.

Unidade	Conteúdo	Conteúdo Específico	Orientações para o educador
Unidade I Espaço sociocultural da Feira	Grandezas físicas	Unidades de medida	Atentar para formas adequadas de mensurar produtos para que se possa pagar um preço justo. Isso porque em algumas feiras os produtos são vendidos com unidades de medida diferenciadas. Por exemplo, é comum na região da Costa do Cacaú a venda de grãos, algumas frutas, especiarias e farinhas utilizando como instrumento de medida o “litro” que é uma lata de óleo de soja.
Unidade II Qualidade dos alimentos e o lixo inadequado na feira	Calorimetria	Temperatura Calor Formas de propagação de calor	Observar a temperatura ambiente em que se encontra a carne. Se exposta ao Sol, como essa situação contribui para o aumento da temperatura e por que isso pode ser prejudicial à qualidade do produto.
Unidade IV Possíveis Alternativas	Calorimetria	Temperatura Trocas de calor Recipientes térmicos	Apresentar formas adequadas de conservação de alimentos perecíveis, seja pelo isolamento térmico (que pode ser feito com caixas de isopor), seja por refrigeração ou técnicas de conservação (salga, defumação etc.).



feira, uma vez que, apesar de o feirante salientar que os alimentos da feira são vendidos da mesma forma que no mercado, as carnes ficam expostas ao sol por diversas horas, sem nenhum tipo de refrigeração, além da questão do armazenamento inadequado, que favorece a proliferação de microrganismos, a presença de urubus e outros animais na feira, que tendem a transmitir doenças por meio da contaminação dos alimentos. Desse modo, destaca-se a relação entre a biologia e a física como uma forma de despertar nos educandos a necessidade de aquisição de novos conhecimentos, discutindo-se causas, consequências e alternativas ao problema.

O plano de aula apresentado no Quadro 3 ilustra uma relação interdisciplinar entre a biologia e a física, abordando conceitos como microrganismos, temperatura e calor de acordo com o nível escolar dos educandos. É possível ampliar essa aula em que, por exemplo, se pode abordar as condições de higiene da feira, assim como é possível trabalhar em outros níveis de ensino. Salienta-se que para a elaboração do plano de aula considerou-se a fala de um feirante, a qual é caracterizada como sendo uma fala significativa [12], pois expressa uma situação-limite vivenciada pela comunidade, a exemplo da contradição entre a fala do feirante com a sua realidade, que compara as condições de armazenamento dos alimentos vendidos

no mercado com as da feira do bairro de Fátima. Essa fala é de fundamental importância, pois auxilia a preservar a essência da perspectiva freireana de educação, a qual está pautada no diálogo e na problematização com vistas à superação das situações-limite e transformação social.

O educador que não tem condições de realizar todo o processo de investigação temática, uma vez que envolve um trabalho coletivo com os demais educadores da escola, pode utilizar algumas questões apresentadas por seus educandos e identificadas por ele como necessidades da comunidade. Mesmo que essas questões não sejam legitimadas como situações-limite, tampouco representem um tema gerador, sinalizam um caminho para uma educação crítica e transformadora. Entretanto, implementar essas aulas desconsiderando possíveis situações-limite da comunidade em que está inserida a escola distancia-se da complexidade e riqueza de aspectos que podem ser abordados em um legítimo tema gerador. Por exemplo, além das discussões sobre microrganismos, transferência de calor e variação de temperatura, o tema gerador “As condições da feira nossa de

cada dia do bairro de Fátima, Itabuna/BA” revela a necessidade de se discutir outras questões, relacionadas aos recipientes térmicos para a conservação de alimentos e técnicas de conservação da carne vendida na feira do bairro de Fátima em Itabuna, conforme se apresenta no plano de aula II,<sup>2</sup> no Quadro 4.

O plano de aula II apresenta a relação entre o conteúdo de física e química, propondo o acondicionamento das carnes expostas na feira em recipientes térmicos, por exemplo, o isopor, como uma alternativa ao problema da exposição das carnes, considerando a viabilidade financeira, uma vez que sistemas de refrigeração são caros. Além dos recipientes térmicos, destaca-se a técnica da salga da carne, como forma de conservá-la. Parte significativa das carnes comercializadas na região da Costa do Cacaú é transformada em charque e carne de sol. Dessa forma, busca-se a valorização da cultura local, por meio da história da região, reforçando as técnicas de conservação desenvolvidas pelos moradores das fazendas cacauzeiras no período em que não havia energia elétrica. Assim como o plano de aula I, o plano de aula II também

**O educador que não tem condições de realizar todo o processo de investigação temática, uma vez que envolve um trabalho coletivo com os demais educadores da escola, pode utilizar algumas questões apresentadas por seus educandos e identificadas por ele como necessidades da comunidade**

Quadro 3: Plano de aula I.

Proliferação de microrganismos, transferência de calor e variação de temperatura		
Contexto	Na feira do bairro de Fátima, normalmente, as carnes ficam expostas ao ar livre por muito tempo (a feira funciona de 4h às 14h), comprometendo diretamente a qualidade das mesmas.	
Fala	“A gente compra na mão do abatedor, aí a gente vende, da mesma forma que os mercados” (feirante).	
PI	Se os alimentos da feira do bairro de Fátima não forem conservados em temperatura adequada, o que pode acontecer? Por quê? Qual a importância de conservarmos os alimentos? Como manter refrigerados os alimentos que são vendidos na feira?	O educador problematiza as questões de modo a desenvolver nos educandos a percepção de que os alimentos na feira podem conter microrganismos e que a sua proliferação está relacionada com as condições do meio. O foco da PI é fazer com que os educandos sintam a necessidade de novos conhecimentos para a compreensão dos problemas relacionados à condição de armazenamento de produtos na feira.
OC	Proliferação de microrganismos (contaminação por bactérias e fungos); transferência de calor e variação de temperatura.	O educador pode realizar experimentos que demonstrem ou que levem à investigação dos microrganismos em diferentes condições de temperatura. Para isso, deve considerar diversos alimentos (carnes, verduras e frutas), discutir os tipos de microrganismos (nocivos e benéficos) e suas formas de proliferação, bem como abordar os processos de transferência e retenção de calor e de variação de temperatura.
AC	Retomar as perguntas da PI e realizar uma atividade complementar que consistirá na organização dos alimentos (carnes, verduras e frutas) de forma adequada de acordo com as diferentes partes da geladeira.	A atividade proposta na AC tem como base a distribuição dos alimentos na geladeira de acordo com sua capacidade de refrigeração e conservação do calor no freezer, nas gavetas, na porta etc.

Orientações para o educador

Transferência de Calor e Conservação da Carne

Contexto  
Fala



Fonte das imagens: <http://www.nachapaquente.com.br>  
 Feirante: Nossa mercadoria vem do matadouro daqui de Itabuna mesmo.  
 Pesquisador: Desde que horas você está aqui na feira?  
 Feirante: Quatro horas da manhã.  
 Pesquisador: E acaba que horas?  
 Feirante: Duas horas da tarde.

PI Caso não tenha uma geladeira, como conservar a carne vendida na feira? Como as pessoas daqui da região da Costa do Cacaú conservam a carne quando não têm refrigerador?

O educador pode apresentar para os educandos alimentos que são conservados por meio da salga e comercializados na feira do bairro de Fátima, por exemplo, charque (jabá) e carne de sol, questionando-os sobre o porquê de esses alimentos serem comercializados salgados, enquanto que outros não.

OC Transferência de calor, isolantes térmicos e osmose.

O educador pode abordar o processo de desidratação da carne, tanto pela irradiação solar quando pela salga (aumento da pressão osmótica), além de retomar as discussões da Aula 1 sobre o processo de retenção de calor (recipientes térmicos). O educador pode realizar experimentos ou utilizar simuladores computacionais. Talvez o educando possa não se apropriar de todos os conceitos, mas pelo menos das palavras que os representam, podendo os conceitos ser aprofundados em outros níveis do ensino.

AC Retomar as questões do PI, respondendo com base nos conceitos científicos abordados na OC.

O educando pode elaborar maquetes que ilustram o processo de produção da carne de sol, explicando cada uma das etapas, além de apresentar outras formas de comercialização de alimentos perecíveis, discutindo sobre o uso de recipientes térmicos.

Orientações para o educador

pode ser trabalhado em mais aulas, sendo uma síntese da possibilidade de se abordar conceitos de física no Ensino Fundamental.

**Considerações finais**

A superação de situações-limite, expressas em um tema gerador representativo dos problemas de uma determinada comunidade, requer a construção de um olhar crítico acerca da realidade, o que só é possível por meio da abordagem de conhecimentos científicos de forma articulada e interdisciplinar entre outras áreas do conhecimento, tais como: física, química e biologia. Sendo assim, o processo de Investigação Temática desenvolvido de forma colaborativa com os educadores da rede municipal de Itabuna apontou para a necessidade de se elencarem conhecimentos contextualizados e significativos para a superação das situações-limite eviden-

ciadas durante o processo de obtenção do tema gerador “As condições da feira nossa de cada dia: bairro de Fátima, Itabuna/BA”. Além disso, o processo formativo pautado na investigação temática evidenciou a necessidade de discussões, por meio de outros cursos, mais aprofundadas nas questões relacionadas ao ensino de ciências, pois as educadoras sinalizaram durante o curso a falta de preparo que muitas ainda possuem com relação a esse ensino.

Durante a etapa da redução temática, ficou evidente que os conceitos de uma única disciplina, especificamente da física, são insuficientes para possibilitar que o tema seja compreendido pelos educandos, motivo pelo qual a seleção dos conceitos não deve ser feito por especialistas de uma única área. A aula planejada por meio dos Três Momentos Pedagógicos, além de permitir a relação entre conceitos de física, química e biologia, mostrou-se um poten-

cial para o desenvolvimento de uma visão crítica dos educandos em relação às condições em que os alimentos são armazenados e comercializados na feira. Vale destacar que a relação estabelecida entre os Três Momentos Pedagógicos e a investigação temática foi incorporada nesse curso no sentido de potencializar o desenvolvimento da proposta, haja vista que essa dinâmica possui estreita relação com a dialogicidade e a problematização do conhecimento, aspectos fundamentais na proposta freireana.

Outro aspecto que chama a atenção é o fato de que as aulas foram planejadas no contexto de um tema gerador, mas isso não impossibilita que elas sejam desenvolvidas fora deste. Entende-se que nem sempre é possível desenvolver o processo de investigação temática para se obter um tema gerador no contexto escolar brasileiro, por diversos motivos, tais como: fal-

ta de tempo dos educadores devido ao excesso de carga horária de aulas, pouca flexibilização do currículo e pouca iniciativa dos gestores escolares em participar e estruturar novas propostas de trabalho, entre outros. A partir da perspectiva freireana de educação, tais aspectos desafiadores podem começar a ser sanados por meio de iniciativas de educadores ao organizar planejamentos de atividades didático-pedagógicas de física

**Todavia, ressalta-se que temas que não foram obtidos pelo processo de investigação temática não podem ser denominados temas geradores, pois isso esvaziaria a riqueza de sua essência**

de forma coletiva, de modo a valorizar não somente a interação entre as distintas áreas de conhecimento, mas também a participação social no currículo, ouvindo as diferentes vozes que se fazem presentes

no contexto escolar (pais, educandos, comunidade local). Desse modo, é possível trabalhar a física de forma contextualizada e interdisciplinar, sendo que as aulas podem ser planejadas tomando como referência as situações reais em que vivem os educandos. Para isso, o educador necessita estar disposto a mudar a forma de olhar para a realidade, problematizando, por exemplo, as falas dos próprios educandos, bem como informa-

ções de sites e blogs da comunidade que retratam suas possíveis situações-limite. Todavia, ressalta-se que temas que não foram obtidos pelo processo de investigação temática não podem ser denomi-

nados temas geradores, pois isso esvaziaria a riqueza de sua essência.

Por fim, é importante destacar que conceitos de física, assim como os de biologia e de química, não foram suficientes para a compreensão e a superação de situações-limite envolvidas no tema gerador “As condições da feira nossa de cada dia: bairro de Fátima, Itabuna/BA”. Destaca-se que é preciso discutir aspectos para além do âmbito escolar, no sentido de unir conceitos científicos e conteúdos na construção de conhecimentos significativos socialmente, fomentando o desenvolvimento de ações individuais e coletivas do poder público e a promoção de Políticas Públicas.

### **Agradecimentos**

Ao apoio financeiro da Capes, Fapesb e CNPq.

### **Referências**

- [1] D. Delizoicov, *Concepção Problematizadora para o Ensino de Ciências na Educação Formal: Relato e Análise de uma Prática Educacional na Guiné-Bissau*. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, 1982.
- [2] G.M. Stuani, *Abordagem Temática Freireana: Uma Concepção de Formação Permanente dos Professores de Ciências*. Tese de doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.
- [3] F.G. Centa e C. Muenchen, *Alexandria Revista de Educação em Ciência e Tecnologia* **9**, 1, (2016).
- [4] A.P. Solino e S.T. Gehlen, *Alexandria Revista de Educação em Ciência e Tecnologia* **7**, 75 (2014).
- [5] A.P. Solino e S.T. Gehlen, *Ciência & Educação* **21**, 911 (2015).
- [6] E.S.P. Novais, *Contribuições da Abordagem Temática Freireana para o Ensino de Ciências de uma Escola do Campo de Iguai/BA*. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Santa Cruz, 2015.
- [7] K.N. Fonseca, *Investigação Temática e a Formação Social do Espaço: Construção de uma Proposta com Professores dos Anos Iniciais*. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Santa Cruz, 2017.
- [8] P. Freire, *Pedagogia do Oprimido* (Paz e Terra, Rio de Janeiro, 1987), 17 ed.
- [9] C.A. Neres, *O Processo de Investigação Temática no Contexto da Formação de Professores de Ciências: Um Olhar a Partir de Fleck*. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Santa Cruz, 2016.
- [10] P.S. Sousa, A.P.S. Bastos, P.S. Figueiredo e S.T. Gehlen, *Alexandria - Revista de Educação em Ciência e Tecnologia* **7**, 155 (2014).
- [11] D. Delizoicov, J.A.P. Angotti e M.M.C.A. Pernambuco, *Ensino de Ciências: Fundamentos e Métodos*. (Cortez, São Paulo, 2011), 3 ed.
- [12] A.E.G. Silva, *A Construção do Currículo na Perspectiva Popular Crítica: Das Falas Significativas Às Práticas Contextualizadas*. Tese de doutorado, PUC, 2004.

### **Notas**

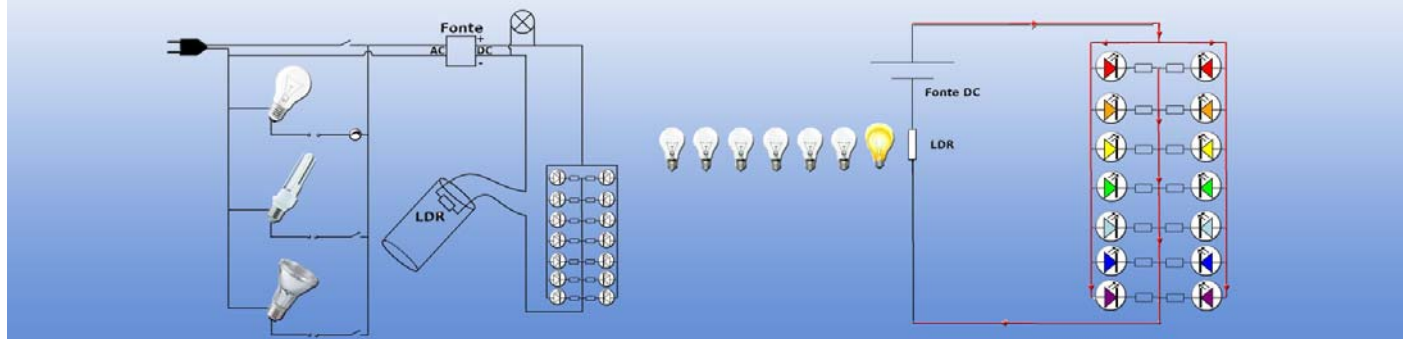
#Este artigo é uma versão ampliada de trabalho apresentado no XXII Simpósio Nacional de Ensino de Física (SNEF), 2017.

<sup>1</sup>O GEATEC é um grupo de estudos que tem desenvolvido diversas atividades educativas para o ensino de ciências, pautados na perspectiva freireana de educação. Muitos dos trabalhos vinculados a esse grupo apresentam atividades didático-pedagógicas elaboradas e implementadas em escolas da região de Ilhéus-Itabuna, Sul da Bahia, as quais podem ser localizadas no site <https://sites.google.com/site/uescgeatec/>.

<sup>2</sup>Na dissertação de mestrado de Fonseca [7] há um plano de ensino e planos de aulas desenvolvidos a partir do tema gerador “As condições da feira nossa de cada dia do bairro de Fátima, Itabuna/BA”; a dissertação pode ser obtida em <http://www.biblioteca.uesc.br/biblioteca/bdtd/201511566D.pdf>.



# LÚDICO: Luxímetro Didático Comparativo



M.M. Lopim<sup>1,2</sup>,  
S.L. França<sup>1,2</sup>,  
M.F.S. da Costa<sup>1,2</sup>,  
B. Gonçalves<sup>2</sup>,  
B.F. Rizzuti<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Física, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora - MG, Brasil

<sup>2</sup>Núcleo de Física, Laboratório de Inovação Tecnológica, Instituto Federal Sudeste de Minas Gerais, Juiz de Fora - MG, Brasil

\*E-mail: brunorizzuti@ice.ufjf.br

## Introdução

A utilização consciente de energia elétrica é uma questão em alta na atualidade, principalmente em um momento em que as mudanças climáticas influenciam nossa principal fonte de geração de energia elétrica, as usinas hidrelétricas [1]. Caminhando nesse sentido, no ano de 2010 foi publicada a portaria interministerial número 1007 [2], que exige mínima eficiência energética de lâmpadas incandescentes para sua comercialização. Com a concorrência de mercado, tais lâmpadas foram sendo gradativamente substituídas por lâmpadas mais eficientes, por exemplo as fluorescentes compactas e as lâmpadas de LED (*light emitting diode*). Poderíamos então perguntar quais propriedades físicas de uma lâmpada a caracterizariam como mais eficiente em relação a outras. Este trabalho propõe uma resposta a esse questionamento, apresentando um luxímetro didático e comparativo (LÚDICO). O aparato consiste em um quadro capaz de coletar informações como corrente e temperatura de lâmpadas (incandescente, fluorescente compacta e de LED), além de apresentar também uma escala de LEDs, que estão dispostos com as cores do espectro de frequência cada vez mais alta. Essa escala indica o poder de iluminação das lâmpadas que serão comparadas. Os detalhes de construção e funcionamento de cada componente do LÚDICO serão apresentados ao longo do trabalho.

Se por um lado o aparato compara lâmpadas, por outro apresentamos um instrumento didático que pode ser utilizado em sala de aula para a introdução de diversos conceitos físicos distintos. Res-

saltamos que os objetivos principais deste trabalho são mostrar como construir o produto, além de sugerir possíveis aplicações em sala aula. Não é nosso foco aqui discutir a eficácia para ensino-aprendizagem nem aprofundar em metodologias pedagógicas.

## A construção do instrumental

Nesta seção vamos detalhar o instrumental, incluindo materiais, dispositivos eletrônicos e elétricos, materiais de fixação e de segurança. Ela será dividida em duas partes. Na primeira, exibiremos o exterior do produto; já na segunda, mostraremos o interior do LÚDICO, com especificações dos circuitos que o compõem e, sempre que necessário, detalhes da montagem serão apresentados.

## Exterior do LÚDICO

O instrumental foi projetado para ser de fácil manuseio e transporte e de reprodução simplificada. Dessa forma, o mesmo foi construído com as características de um quadro de madeira (em forma de mala) com as seguintes dimensões: 65 cm de largura, 48 cm de comprimento e 5 cm de altura. A madeira utilizada na fabricação é do tipo MDF

(*Medium Density Fiberboard*), material oriundo de madeira e fabricado com resinas sintéticas, nas espessuras de 6 mm para o tampo, 9 mm para o fundo e 15 mm para as laterais.

Iniciamos o detalhamento com a parte externa do quadro, conforme a Fig. 1. Ela foi enumerada com os diversos componentes do produto, que passaremos a descrever.

1) Cabo de energia: é constituído de um fio paralelo, bitola 2,0 mm com aproximadamente 3 m de comprimento. Sua

**Quais propriedades físicas de uma lâmpada a caracterizariam como mais eficiente em relação a outras? Este trabalho propõe uma resposta a esse questionamento, apresentando um luxímetro didático e comparativo**

Apresentamos neste trabalho um luxímetro didático e comparativo (LÚDICO), com o propósito de contrastar lâmpadas quanto à sua eficiência energética. O aparato coleta informações como temperatura e corrente de lâmpadas em funcionamento, apresentando também uma escala de LEDs que retrata a eficiência luminosa destas. Além desse caráter comparativo, o LÚDICO mostra-se um instrumento didático visualmente atrativo para ensino de diversos conceitos físicos.





Figura 3: Placa composta de 18 sensores LDR ligados em paralelo para captação de luminosidade.

quando conhecemos como dois componentes do circuito funcionam. São eles o LDR e o LED.

O LDR é um resistor que altera sua resistência quando iluminado, chegando a variar a resistência da ordem de megaohms, quando o sensor está no escuro, a ohms, quando é iluminado [4].

O LED é um diodo que emite luz e suas aplicações vão da formação de letras/números em placares digitais, passando pela iluminação de lares com baixo custo energético e chegando até mesmo à transmissão de dados com LEDs infravermelhos em controles remotos. Sua importância é tão fundamental para nosso mundo moderno que os idealizadores do LED azul foram laureados com o Nobel em 2014 [5]. Os LEDs possuem polarização, isto é, só acendem com os polos positivos e negativos de uma fonte conectados corretamente no diodo. Uma de suas propriedades mais notáveis é que eles precisam de um potencial mínimo para acender, fato este que só pode ser explicado pela mecânica quântica [6]. Como consequência disso, quando alimentamos um LED com uma fonte variável, ele apresenta resistência infinita à passagem de corrente, até que se atinja o potencial mínimo para que ele acenda, quando então sua resistência fica próxima do zero.

Com estas informações em mãos, já podemos entender nosso “luxímetro qualitativo” [7]. Conectamos a associação de LDRs em série com a fonte, gerando com isso uma bateria ruim, pois sua resistência interna é alta, ao ponto de que nenhuma corrente passe pelo circuito com os LEDs e ainda não haja tensão mínima para acender nem mesmo o LED vermelho (dentro os LEDs de alto brilho utilizados, o vermelho é o que necessita de menor tensão para ser aceso. Curiosamente, quanto maior a frequência da cor emitida, maior

a tensão mínima para ser acesa). Essa situação ocorre com o tubo coletor de iluminação totalmente no escuro. À medida que o tubo é iluminado, seja por luz ambiente ou por alguma das lâmpadas, baixamos a resistência dos LDRs, fazendo com que nossa bateria melhore. A colocação de 18 LDRs no equipamento foi empiricamente determinada para que o mesmo apresentasse funcionamento satisfatório. Dessa maneira, podemos acessar as tensões necessárias para o acendimento da escala de LEDs, que por sua vez caracteriza o poder de iluminação de cada lâmpada. O efeito de uma escala que acende na ordem do espectro visível confere ao produto um caráter visualmente atrativo.

Com a sequência de imagens nas Figs. 4 e 5, representamos simbolicamente situações em que uma lâmpada é colocada sobre o LDR, acendendo somente até o LED verde, passando pelo vermelho, laranja e amarelo. Quando uma lâmpada com maior poder de

**O LED é um diodo que emite luz e suas aplicações vão desde placares digitais, passando pela iluminação de lares com baixo custo energético e chegando à transmissão de dados com LEDs infravermelhos em controles remotos**

composto pelos LDRs, deverá encobrir cada lâmpada acesa, de forma que sejam verificadas no painel o acendimento e o brilho dos LEDs, que estão dispostos acendendo na mesma ordem das cores do espectro eletromagnético visível.

No terceiro bocal, os mesmos procedimentos são realizados para a lâmpada incandescente. Ela é deixada por último devido ao seu aquecimento, podendo até mesmo, por exemplo, derreter o copo preto. A diferença é que nessa etapa podemos

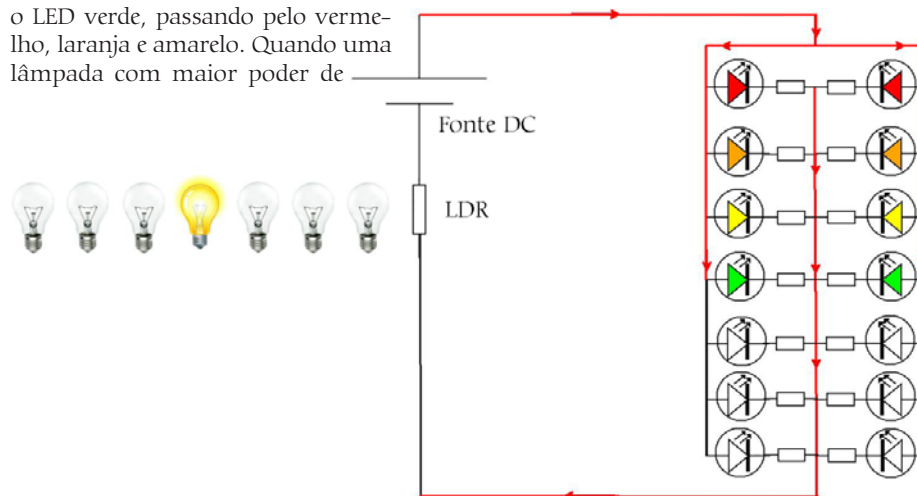


Figura 4: Acendimento dos LEDs com uma lâmpada com poder de iluminação médio.

iluminação é colocada, ele poderia, por exemplo, acender até o LED violeta (nestas figuras, quanto mais longe do LDR está a lâmpada acesa, menor é o seu poder de iluminação).

### Utilização

Inicialmente, pluga-se a tomada anexada ao LÚDICO no terminal de 127 V. As três lâmpadas – incandescente, fluorescente e de LED – são enroscadas nos três bocais, sendo que a incandescente deve ser ajustada no bocal com o *dimmer*. Liga-se a chave geral e a lâmpada piloto acende, indicando que o quadro está energizado.

As lâmpadas fluorescente e de LED são acesas e cobertas com o copo preto; esperamos em torno de três minutos para que atinjam o equilíbrio térmico. Medimos então a temperatura das duas lâmpadas com o termômetro infravermelho. As respectivas correntes são ligadas com o amperímetro, com fundo de escala de 20 mA e ajustado para corrente alternada. Os fios do amperímetro são plugados nas entradas RCA. Na sequência, o fotossensor,



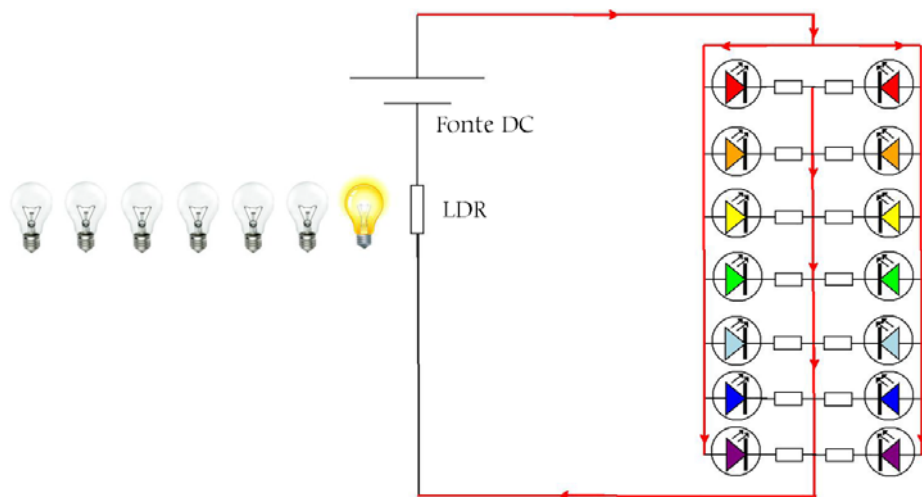


Figura 5: Representação esquemática de uma lâmpada com poder de iluminação maior que a lâmpada da Fig. 4.

usar o *dimmer* para controlar o brilho da lâmpada e assim obter variações nos valores de corrente, temperatura e de cores de LEDs acesos. Para uma demonstração de utilização do LÚDICO, convidamos o leitor a assistir ao vídeo <https://youtu.be/xZuHVwBLN2E>.

### Possíveis aplicações em sala de aula

Esta seção é dedicada a algumas sugestões de aplicações do produto em sala de aula. Serão apresentadas três atividades, nas próximas subseções.

Pela sua estrutura, o LÚDICO pode possibilitar a aquisição de diferentes habilidades e competências. Entre várias, podemos destacar: aprender a fenomenologia da eletricidade em situações reais, como o reconhecimento de aparelhos elétricos, dimensionando a utilização de cada equipamento; compreender o significado dos dispositivos eletrônicos e suas devidas aplicações e, por fim, que eles possam apreciar a economia de energia por meio do estudo sobre a eficiência de lâmpadas.

### Efeito Joule

O efeito Joule corresponde ao aquecimento de determinado condutor ao resistir à passagem de corrente elétrica. São inúmeras as aplicações de tal efeito, por exemplo, ferros de passar roupa, resistên-

cias dos chuveiros e aquecedores são todos baseados nesse fenômeno. Este trabalho propõe então um estudo quantitativo sobre o efeito Joule, utilizando uma lâmpada incandescente. Com o produto apresentado para uma turma, os alunos são convidados a fazer medidas tanto de corrente quanto de temperatura de cada uma das lâmpadas, incandescente, fluorescente e de LED. Sugerimos que as lâmpadas sejam acesas com certa antecipação, para garantir que as mesmas tenham atingido uma situação de equilíbrio térmico. Para que a luz emitida não seja incômoda, o professor tampa as lâmpadas acesas com um copo plástico preto, que acompanha o produto. A coleta de dados pelos alunos pode ser feita, por exemplo, com a Tabela 1.

É importante ressaltar que para cada medida de corrente elétrica deve-se realizar uma de temperatura ou vice-versa, e ambas devem ser anotadas. Após essa etapa, os alunos devem discutir sobre os resultados coletados. Abaixo deixamos uma lista de possíveis perguntas que o professor pode dar aos alunos para induzir a discussão:

- i) Qual das lâmpadas esquentou

mais?

ii) Qual delas utiliza mais corrente elétrica?

iii) Você consegue estimar uma relação entre corrente e temperatura?

iv) Onde ocorre o efeito Joule na lâmpada incandescente? E nas outras lâmpadas, que não possuem filamento?

v) Quais as aplicações do efeito Joule no seu cotidiano?

Sugerimos que essa aplicação seja feita para alunos da terceira série do Ensino Médio, por envolver conceitos de eletricidade.

### $E = hf$ e a quantização da energia

Uma outra atividade que propomos está ligada à verificação, ao menos qualitativa, da fórmula famosa

$$E = hf \quad (1)$$

proposta por A. Einstein para explicar o efeito fotoelétrico [8].

O professor propõe à turma que se regule o *dimmer* para que a lâmpada incandescente apresente o maior brilho, anotando o valor da corrente que a alimenta, tomando nota também da cor do LED

aceso. O *dimmer* é então regulado vagarosamente para que a lâmpada brilhe cada vez menos. Durante essa etapa, quem regula o *dimmer* deve pausar a rotação para que sejam anotados os valores de corrente e cor. Os dados podem ser anotados, por exemplo, em uma tabela como a apresentada na Fig. 6.

O professor deve, de maneira qualitativa, relacionar a corrente na lâmpada incandescente com energia. A palavra “energia” neste experimento consiste na energia luminosa emitida pela lâmpada e coletada pelo sensor LDR (com maior valor de corrente elétrica, a lâmpada brilha com mais intensidade). O experimento retrata que a energia é uma função monótona com a frequência do LED aceso: quanto maior a corrente, maior a frequência do LED aceso na escala. Assim, de maneira qualitativa, o professor induz a classe a concluir que  $E \sim f$ .

O professor também pode explorar o caráter “quântico” da escala de LEDs: todos eles são alimentados pela mesma fonte, conforme indica a Fig. 2. Contudo, nem todos acendem simultaneamente. De fato, ao girar o *dimmer*, vemos que cada vez menos LEDs vão se mantendo acesos e notavelmente eles se apagam por grupos de cores. Esse comportamento é ortogonal à própria lâmpada incandescente. Ela vai

Tabela 1: Coleta de dados para estudo do efeito Joule.

Lâmpadas	Corrente	Temperatura
Incandescente		
Fluorescente		
LED		





.....  
**Thiago Queiroz Costa**

Instituto Federal do Paraná, Campus  
Ivaiporã, Ivaiporã, PR, Brasil  
E-mail: thiago.costa@ifpr.edu.br

.....  
**Usley da Silva Cherpinski**

Instituto Federal do Paraná, Campus  
Ivaiporã, Ivaiporã, PR, Brasil  
.....

### Introdução

**H**á algum tempo, discussões relacionadas à matriz energética brasileira permeiam as discussões nos mais variados setores da sociedade, principalmente nos diversos momentos de crise energética que atingiram e impactam a vida da população. Nesse sentido, dentro de tal temática, sobretudo relacionado às energias renováveis, a proposta deste trabalho é desenvolver um kit experimental de baixo custo para se medir a eficiência de uma fotocélula ou célula fotovoltaica ou simplesmente célula para fins didáticos com foco na educação básica.

O kit é composto então por uma fotocélula conectada a um potenciômetro, cabos elétricos e um suporte articulado a fim de variar parâmetros luminosos que chegam até o dispositivo [1]. O material base desse kit foi aproveitado de luminárias comumente empregadas em jardins como iluminação decorativa (Fig. 1). Esses dispositivos possuem como material semiconductor de suas células geralmente filmes finos de Silício amorfo (a-Si) ou também policristais como cobre, índio, gálio e seleneto (CIS/CIGS).

Embora existam opções de menor preço em diversos sítios eletrônicos,

A proposta desse trabalho consistiu em desenvolver um kit experimental de baixo custo, relacionado a alguns conceitos de Física Moderna e Contemporânea (FMC) dentro de um projeto de pesquisa/extensão voltado para professores de física da rede estadual. Ao longo deste, foram buscadas atividades relacionadas com aplicações da FMC por se acreditar na maior abrangência dessa opção frente ao público-alvo. Nesse sentido chegamos ao kit aqui apresentado, composto então por uma fotocélula conectada a um potenciômetro, cabos elétricos e um suporte articulado com o objetivo principal de se medir a eficiência de tal dispositivo quando exposto à radiação luminosa ou artificial, onde é possível se utilizar tal aparato com diversos enfoques metodológicos, podendo contribuir com a área de ensino de física e ciências.



Figura 1: Exemplo de luminária de jardim do tipo "solar". Fonte: [www.blogdaengenharia.com](http://www.blogdaengenharia.com), acesso em Junho de 2018.

optou-se pela escolha dessa luminária pois a célula é fixada a um vidro que tem a função de sustentação e proteção e também a parte interna e traseira dessa célula acondiciona perfeitamente o potenciômetro a ser utilizado (Fig. 2).

### Objetivo

Desenvolver um kit experimental de baixo custo para se medir a eficiência de uma fotocélula ou célula fotovoltaica ou simplesmente célula para fins didáticos



Figura 2: Aspecto da célula fotovoltaica (frente e verso).



com foco na educação básica.

## Materiais e equipamentos

Para a confecção do kit foram usados os seguintes materiais e equipamentos:

### Materiais

- 1 Luminária de jardim solar;
- 1 potenciômetro linear ou logarítmico com valores entre 1 kΩ a 5 Ω;
- 4 pinos banana (2 vermelhos e 2 pretos);
- Espaguete termo-retrátil ou fita isolante;
- Estanho para solda;
- Fios elétricos coloridos e finos;
- Madeira para a base do kit;
- Suporte articulado de alarme.

### Equipamentos e ferramentas:

- Alicates de corte;
- Chave de fenda cruzada (chave "Phillips");
- Estilete;
- Ferro de Solda;
- 2 Multímetros digitais.

### Metodologia /procedimentos experimentais

A proposta deste trabalho é a montagem de um kit experimental baseado em uma célula fotovoltaica aproveitada de luminárias decorativas de jardim e, com tal dispositivo, medir a eficiência energética do mesmo ao expô-la à radiação solar. Para tanto, com o auxílio de uma carga conectada à célula, variam-se duas grandezas físicas, tensão ( $V$ ) e corrente ( $i$ ) e com tais variações plotam-se duas curvas: corrente ( $i$ ) em função da tensão ( $V$ ) e po-

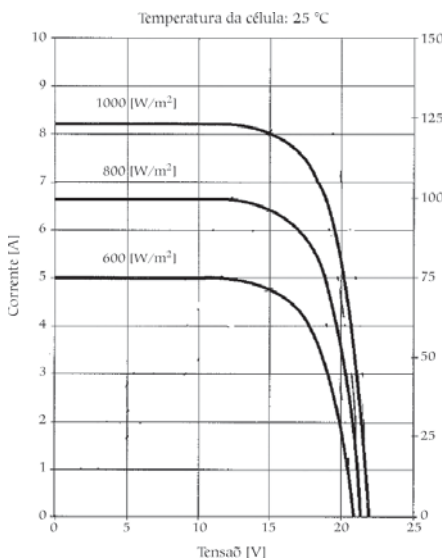


Figura 3: Curva característica  $i$  vs.  $V$  para a célula fotovoltaica. Fonte: Ref. [2].

tência ( $P$ ) em função da tensão ( $V$ ).

A curva  $i$  vs.  $V$  é característica para uma célula fotovoltaica (Fig. 3), pois uma célula fotovoltaica não se comporta como uma fonte elétrica convencional. A célula não apresenta uma tensão de saída constante nos seus terminais. A tensão elétrica depende de sua corrente e vice-versa [3].

A partir da curva potência  $P$  vs.  $V$  gerada pela célula, é possível medir a eficiência da célula fotovoltaica por meio da seguinte relação

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} \times 100\% \quad (1)$$

em que  $P_u$  é a potência útil "fornecida" pela célula e  $P_a$  é a potência absorvida pela célula em  $W/m^2$ .

É possível empregar a Eq. (1), pois uma célula como a utilizada neste trabalho comporta-se tecnicamente como um gerador de corrente contínua; logo, podemos aplicar a fórmula do rendimento de uma máquina em regime de corrente contínua [2]. Ainda relacionado com a expressão, a potência útil é obtida a partir da identificação do ponto de pico (potência máxima) na curva apresentada na Fig. 4. [3].

Para se obter a potência absorvida pela célula, deve-se conhecer a intensidade da radiação solar, irradiação ou irradiância em  $W/m^2$  que atinge o dispositivo multiplicada pelo valor da área da célula em  $m^2$ . Para se medir a irradiância de forma precisa, é necessário o uso de aparelhos denominados solarímetros; contudo, devido a esta proposta ser voltada para o ensino, sugere-se o uso de estimativas para essa grandeza, em acordo com as condições atmosféricas locais no momento de

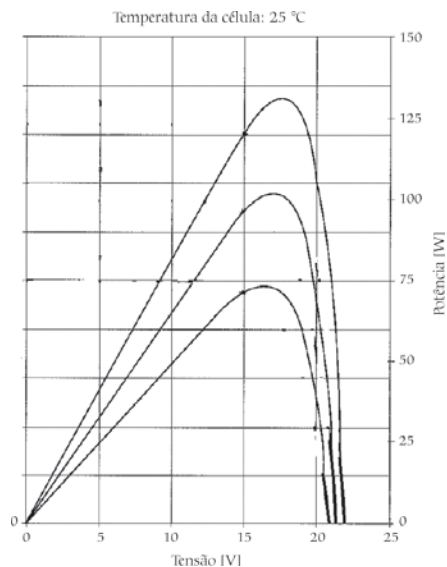


Figura 4: Curva característica  $P$  vs.  $V$  para a célula fotovoltaica. Fonte: Ref. [2].

realização da atividade experimental. Para tais estimativas, empregou-se o gráfico da Fig. 5.

A depender da condição climática do local, usa-se um dos valores indicados na Fig. 5, ou seja, 1000  $W/m^2$  com o dia ensolarado e sem nuvens, cerca de 700  $W/m^2$  para o dia com sol entre nuvens, aproximadamente 400  $W/m^2$  para os dias nublados e nos dias de chuva cerca de 100  $W/m^2$  – mesmo que nesta proposta não seja possível realizar a atividade em dias chuvosos, os demais são plausíveis.

### Montagem do kit experimental

Para o desenvolvimento desse kit experimental, iremos conectar uma carga à célula; no caso, usaremos um potenciômetro linear ou logarítmico com valores entre 1 kΩ a 5 kΩ, de acordo com o circuito elétrico representado na Fig. 6. Em termos de realização do procedimento experimental, a variação da resistência no potenciômetro provocará alterações nos valores da tensão elétrica e na intensidade da corrente elétrica gerados pela célula. Com esses valores, iremos construir as curvas características da célula e também propor a medição da eficiência desse dispositivo.

A partir do diagrama apresentado na Fig. 6 partimos para a montagem desse kit experimental de forma detalhada.

#### Passo 1:

Vamos nos concentrar em utilizar a parte de trás da célula, onde é possível

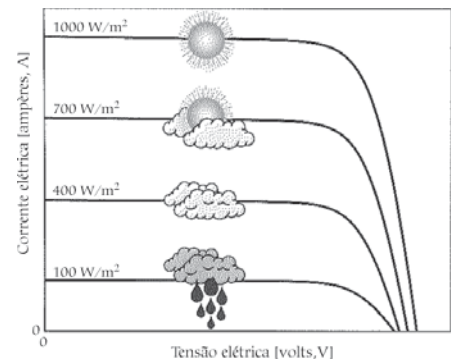


Figura 5: Influência da radiação solar na operação da célula fotovoltaica. Fonte: Ref. [3].

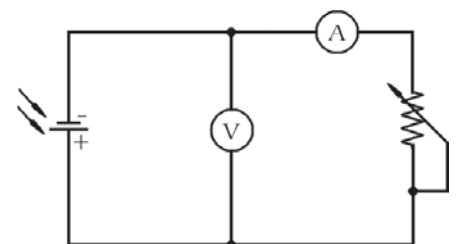


Figura 6: Diagrama da ligação elétrica da célula fotovoltaica.

observar os parafusos que mantêm os componentes internos fixos e também o LED usado para a iluminação decorativa do jardim. Com o auxílio de uma chave de fenda cruzada, ou chave Philips, retire esses parafusos e essa tampa com cuidado para não arrebentar os fios que estarão presos aos LED e também à pilha que vem com o conjunto (Fig. 7).

**Passo 2:**

Retiramos cuidadosamente a pilha, o LED, uma pequena placa de circuito impresso e em alguns modelos também uma chave liga/desliga. Com o auxílio de um alicate, corte os dois fios que se conectam à célula, deixando-os com o maior comprimento possível, conforme ilustra a figura. O fio de coloração azul nesse modelo de célula é o negativo, mas em caso de dúvida, o uso de um multímetro resolve facilmente a questão, pois, dependendo do fabricante, esse padrão de cores muda consideravelmente. Aproveitando ainda o alicate de corte, descasque as pontas dos fios internos da célula (Fig. 8).

**Passo 3:**

O próximo passo é preparar os cabos elétricos de medição; para isso deve-se cortar 4 cabos de cores variadas e com aproximadamente 40 cm de comprimento (neste manual usamos azul, preto, marrom e amarelo, mas poderão ser usadas quaisquer outras cores). Com o auxílio do ferro de solda e estanho solde esses cabos nos plugues banana de modo que fiquem dois cabos com ponta vermelha e os demais com a ponta preta. (Nesta proposta, os cabos de coloração amarela e azul ficaram com os plugues banana vermelhos) (Fig. 9).

**Passo 4:**

Com os cabos preparados, partimos para abrir espaço suficiente a fim de encaixarmos o potenciômetro na parte de trás da célula. Com a ajuda de alicate de corte ou estilete, retire o excesso de plástico, conforme necessário para o encaixe no potenciômetro. Na sequência, encaixe o potenciômetro no orifício central da tampa que anteriormente era ocupado pe-

lo LED, de modo a deixar o botão de ajuste para o lado externo da célula (Fig. 10).

**Passo 5:**

Após preparação dos cabos elétricos, vamos conectar esses cabos com o plugue preto (marrom e preto neste trabalho) ao polo negativo da célula, neste exemplo representado pelo fio de cor azul. Usando os orifícios da tampa da célula, deixe os plugues banana para o lado externo (Fig. 8). Após a conexão, solde esses cabos elétricos que foram unidos anteriormente e isole esse ponto (Fig. 11).

**Passo 6:**

Vamos continuar a conexão dos cabos elétricos, aqueles com os plugues na coloração vermelha. Assim como para os outros, estes devem ser passados pelos orifícios da tampa. Na sequência, em acordo com o circuito elétrico da Fig. 3, parte-se para a soldagem do cabo positivo da célula (vermelho nessa célula) no pino central do potenciômetro e, seguindo a coloração desse kit, solda-se o cabo amarelo (será o que medirá a tensão elétrica da célula) ao pino esquerdo do potenciômetro. Na sequência, com a solda ou com o auxílio de um grampo metálico faça um “jump” nesses dois pinos, deixando-os unidos. Solde o cabo restante (aqui na coloração azul) ao pino livre do potenciômetro (Fig. 12).



Figura 7: Retirada da tampa traseira da célula.



Figura 8: Retirada dos componentes eletrônicos e preparação dos fios da célula.

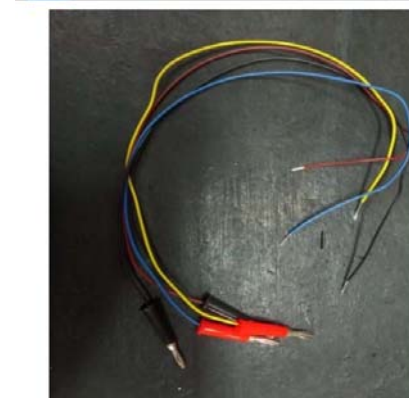
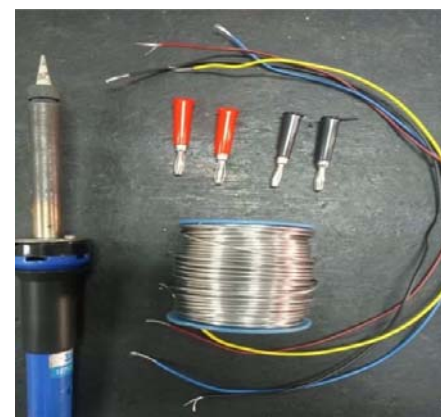


Figura 9: Soldagem dos cabos elétricos para medição de grandezas elétricas.



### Passo 7:

Com os cabos soldados e isolados, feche a tampa com o auxílio dos parafusos e a chave fenda cruzada, de modo que em nossa montagem o cabo amarelo será liga-

do ao voltímetro e o azul ao amperímetro. O último passo dessa montagem é a inserção de um suporte articulado, daqueles usados em alarmes, entre a célula e uma base de madeira ou plástico (Fig. 13).

### Procedimento experimental

Essa proposta é voltada para que a atividade experimental seja realizada ao ar livre sob iluminação solar ou mesmo iluminação difusa ambiente, pois a célula capta tanto a radiação solar direta como a radiação difusa. É possível também realizar a prática em ambiente interno com iluminação artificial, sendo necessário para isso estimar/calcular ou medir a irradiação que chega até a célula.

O procedimento experimental consiste em deixar a célula com uma inclinação, conectá-la ao voltímetro e ao amperímetro, rotacionar o potenciômetro até que o valor da tensão seja o máximo observado (para essa célula, em torno de 2 V), de modo que consideramos esse estado como inicial. Em seguida, deve-se rotacionar o potenciômetro no sentido contrário ao ponto inicial e anotar os valores apresentados no voltímetro e amperímetro de forma a ter no mínimo vinte pontos experimentais ( $V$ ;  $i$ ).

Com tais dados, plota-se a curva ou gráfico  $i$  vs.  $V$  e também a curva  $P$  vs.  $V$  dessa célula, utilizando-se qualquer software de edição de planilha ou softwares próprios para construção de gráficos como *SciDAVis*, que é livre e voltado também para fins educacionais. Um cuidado ao se realizar o procedimento é monitorar a temperatura da célula, a fim de que não se eleve muito, pois esse parâmetro influencia o rendimento de tal dispositivo

### Resultados e discussões

Aqui, apresenta-se um exemplo de



Figura 13: Célula conectada ao voltímetro e amperímetro e célula finalizada.



Figura 10: Encaixe do potenciômetro na tampa da célula fotovoltaica.



Figura 11: Conexão dos cabos elétricos ao polo negativo da célula fotovoltaica.

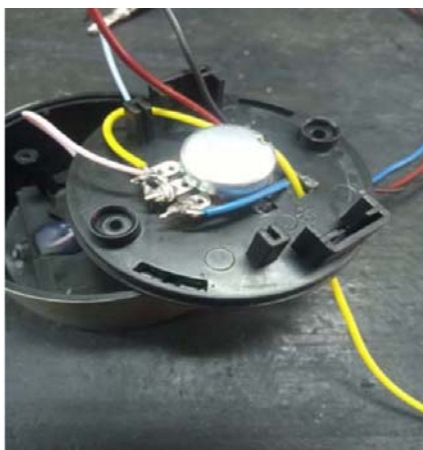


Figura 12: Conexão dos cabos elétricos ao polo negativo da célula fotovoltaica.



dados experimentais (Tabela 1) coletados em diversos momentos na região do campus em que o kit foi desenvolvido, com as principais grandezas relevantes para a atividade experimental.

Com conhecimento desses dados (Tabela 1) e realizando a variação da resistência no potenciômetro conectado a essa célula, foram obtidos os correspondentes pontos experimentais de tensão e corrente ( $V$ ;  $i$ ) medidos com o auxílio de dois multímetros digitais, um na função voltímetro e outro como amperímetro. Primeiramente, com tais dados, apresenta-se o gráfico ou curva experimental  $i$  vs.  $V$  (Fig. 14).

Ao comparar essa curva experimental com a da Fig. 3, é possível observar que o comportamento está dentro do esperado para uma célula fotovoltaica, com uma escala em que se apresentam valores pequenos tanto para tensão quanto para a corrente, devido ao tamanho ou área do dispositivo empregado, mas ressalta-se a obtenção de uma curva experimental adequada aos propósitos educativos desse trabalho. Na sequência, ainda com esses dados experimentais, foi obtida a curva  $P$  vs.  $V$  (Fig. 15), de modo que a potência fornecida pela fotocélula é calculada mediante a multiplicação dos valores da corrente pela tensão.

A curva experimental da potência em função da tensão ( $P$  vs.  $V$ ) também apresentou um comportamento em acordo com o esperado para uma célula fotovoltaica. A partir dessa curva e seguindo a metodologia adequada [3], foi empregado o ponto de máxima potência na Eq. (1) e, com os valores da irradiação e área da célula, foi obtida uma eficiência de aproximadamente 6% para o dispositivo empregado nesta proposta. Para as tecnologias possíveis para essas fotocélulas de jardim, as eficiências ficam numa faixa de 7,5% para a tecnologia de silício amorfo e em torno de 10% para as células de CIS/CIGS [3].

### Considerações finais

Dentro da proposta inicial, foi possível construir um kit experimental didático com custo aproximado de R\$ 15,00 por unidade, sendo então factível de se usar em diversas realidades e contextos educacionais. É possível ainda utilizá-lo em variados níveis de ensino e com variadas propostas metodológicas, desde o laboratório tradicional até uma abordagem com enfoque CTSA (Ciência, Tecnologia, Sociedade e Ambiente).

A depender dos conhecimentos técnicos e disponibilidade do professor, é possível tornar tal kit ainda mais barato, com a compra da célula em quantidade em sítios diversos na internet, sendo

Tabela 1: Parâmetros experimentais da célula exemplo desta proposta.

Parâmetros experimentais	
Área da célula	$9 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
Condição ambiental	Dia ensolarado sem nuvens
Horário	11:00 h
Irradiação estimada	$800 \text{ W/m}^2$
Temperatura no local	$22 \text{ }^\circ\text{C}$

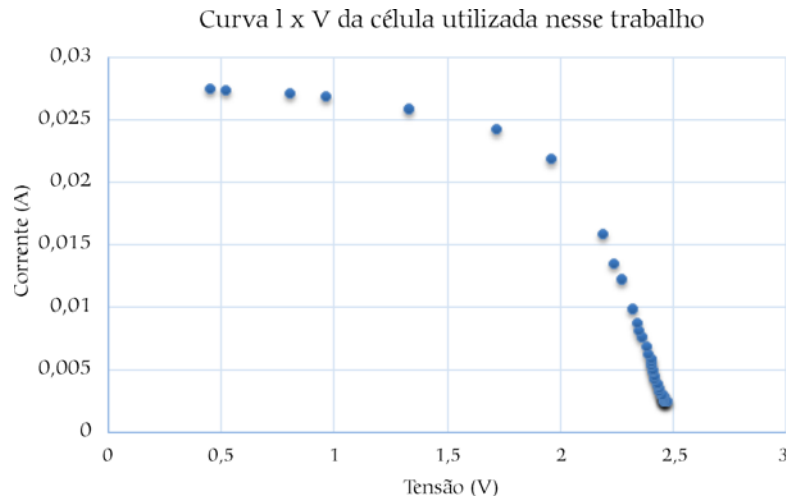


Figura 14: Curva experimental  $i$  vs.  $V$  para a célula empregada neste trabalho.

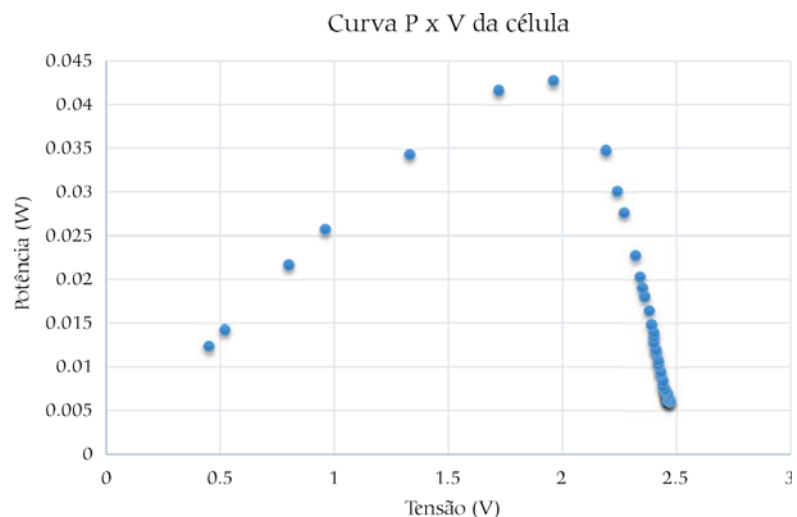


Figura 15: Curva experimental  $P$  vs.  $V$  para a célula empregada neste trabalho.

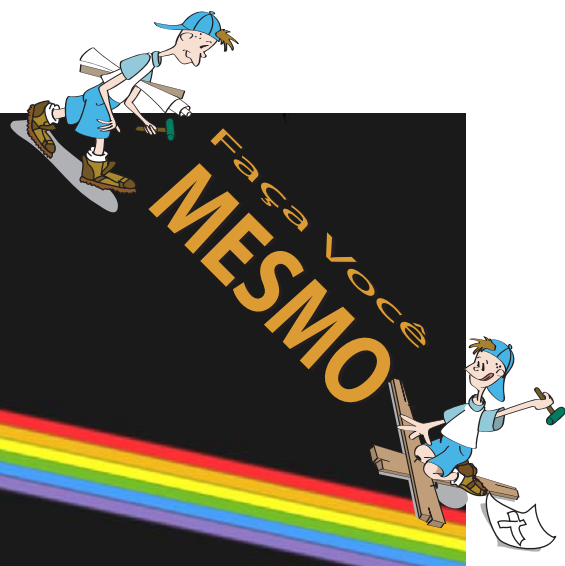
necessárias algumas adaptações à proposta aqui apresentada. Outro ponto a destacar foram as curvas experimentais obtidas, que se aproximam do que era esperado para as células fotovoltaicas;

portanto, dentro dos objetivos, acredita-se que a proposta aqui apresentada pode contribuir no sentido de promover atividades experimentais no ensino de ciências como um todo.

### Referências

- [1] D.O. Toginho Filho e E. Laureto, in: *Catálogo de Experimentos do Laboratório Integrado de Física Geral, Departamento de Física*, editado por D.O. Toginho Filho e E. Laureto (Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2010).
- [2] F.A.S. Pereira e M.A.S De Oliveira, *Laboratórios de Energia Solar Fotovoltaica* (Publindústria, Porto, 2011).
- [3] M.G. Villalva, *Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações* (Erica, São Paulo, 2013).

# Revisitando os prismas caseiros: Uma atividade experimental no estudo da refração da luz



.....  
**Diogo Soga**

Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil  
E-mail: diogosp@usp.br

**Doris Kohatsu**

Instituto Federal de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil

**Mikiya Muramatsu**

Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil  
.....

## Introdução

Uma das experiências científicas mais famosas é a decomposição da luz do sol com um prisma, realizada por Isaac Newton [1-4] em 1672. A decomposição da luz no arco-íris era um fenômeno físico conhecido. Embora Descartes (1637) e Boyle (1664) tenham realizado o experimento com o prisma [1, 3] antes de Newton, eles observaram somente uma mancha de luz branca e colorida nas extremidades. Newton obteve sucesso utilizando poucos recursos: um prisma, a luz do sol, e uma sala bem escura. Newton fez um orifício numa tábua da janela, da ordem de um centímetro, por onde entrava um feixe de luz solar que incidia sobre um prisma de vidro. Na parede oposta, a 5,5 m do prisma, observou uma faixa oblonga colorida, efeito da luz solar refratada pelo prisma [5]. Em experimentos subsequentes, utilizando dois prismas, realizou a recomposição das luzes coloridas formando novamente a luz branca, demonstrando assim que a luz branca é uma mistura de luzes de todas as cores. Inicialmente, Newton identificou apenas cinco cores no espectro da luz solar branca – violeta, azul, verde, amarelo e vermelho. Fazendo analogia com as sete notas da escala musical [6], Newton nomeou sete cores – violeta, anil, azul, verde, amarelo, alaranjado e vermelho. Newton publicou sua teoria das cores em 1672, no *Philosophical Transactions*, quando tinha apenas 23 anos, e mais tarde, em 1704, no livro *Óptica*.

Esse experimento é repetido em aulas durante o estudo da refração [4, 7-12]

como uma atividade prática interessante para demonstrar a dependência da refração com cor da luz, isto é, a luz refrata em ângulos diferentes para cada comprimento de onda da luz, o que leva à decomposição da luz branca. Além desse experimento, outros experimentos [13-16] ilustram os fenômenos físicos de óptica em sala de aula. Essas atividades são construídas para incrementar o interesse dos alunos pelo estudo das ciências.

Neste trabalho revisitamos as propostas de construção de prismas caseiros e usamos um prisma de acrílico comercial para comparação. Também propomos a construção de prismas com materiais mais baratos e de formato mais prático.

Na próxima seção vamos discutir o fenômeno da refração [17], em seguida apresentamos os diversos prismas, bem como os nossos modelos propostos, as fontes de luz utilizadas nos experimentos, onde apresentamos alternativas à luz do sol, e, por último, os experimentos com os prismas e os seus resultados.

## Refração

Tanto no arco-íris como no experimento do prisma, a luz solar branca é separada nas suas componentes devido ao fenômeno da refração. Mas o que é a refração da luz? Você já olhou um lápis dentro de um copo de água? Parece que ele está quebrado. O lápis quebrou dentro da água ou a imagem do lápis que você vê está diferente? A luz que sai do lápis e chega nos seus olhos atravessa a água e o vidro. Quando a luz muda o meio por onde caminha, sua velocidade de propagação muda. Esse fenômeno os físicos chamam de refração. A aparente quebra do lápis, então, aconteceu

**Uma das experiências científicas mais famosas é a decomposição da luz do sol com um prisma, realizada por Isaac Newton em 1672. Neste trabalho revisitamos as propostas de construção de prismas caseiros e usamos um prisma de acrílico comercial para comparação**

O trabalho apresenta uma revisão dos prismas caseiros usados em experimentos de dispersão da luz branca, similares ao experimento realizado por Isaac Newton, publicado em 1672, usando um prisma de vidro. Também apresenta um novo modelo que é construído usando plástico transparente de embalagens ou da capa de CD/DVD, ao invés de usar lâminas de vidro. Além disso, apresenta um estudo que indica novas fontes de luz ao invés da luz do sol e as condições propícias que melhoram a visualização do espectro visível da luz, utilizando materiais de fácil acesso

por uma mudança de direção do caminho inicial da luz, consequência da mudança da velocidade da luz ao mudar de meios (Fig. 1).

Os gregos antigos [18] já observavam um desvio no caminho da luz quando ela mudava do ar para a água. Claudius Ptolemy, em 140 A.D., encontrou uma relação entre os ângulos da luz no ar e na água. Cerca de quinze séculos depois, em 1621, o matemático e astrônomo holandês Willebrord Snell, descobriu a relação matemática entre esses ângulos. René Descartes descobriu a mesma relação a partir de seus estudos teóricos, publicados em 1637. A lei da refração, ou lei de Snell-Descartes [17], pode ser escrita como:  $n_1 \cdot \sin\theta_1 = n_2 \cdot \sin\theta_2$ . O índice de refração ( $n$ ) da luz indica quantas vezes a velocidade da luz ( $v$ ) diminui ao passar do vácuo para um meio qualquer. Matematicamente, o índice de refração é dado pela razão entre a velocidade da luz no vácuo ( $c$ ) e a velocidade da luz no meio ( $v$ ),  $n = c/v$ .

A luz é uma onda eletromagnética [17] que pode ser caracterizada por um comprimento de onda. A região da luz visível pode ser descrita pelas cores: violeta, azul, verde, amarelo, laranja e vermelho. No entanto, a cor só é percebida quando a luz interage com o olho humano, de modo que o reconhecimento das cores depende da sensibilidade de cada indivíduo. Cada cor pode ser associada a um valor de comprimento de onda. O índice de refração da luz depende do comprimento de onda, como vemos na Tabela 1. A cor azul tem maior refringência, caminha com menor velocidade e se desvia mais do caminho inicial. No outro extremo temos a cor vermelha, com menor refringência, desviando-se menos. No caso de termos dois raios de luz de cores diferentes movendo-se paralelamente, ao mu-

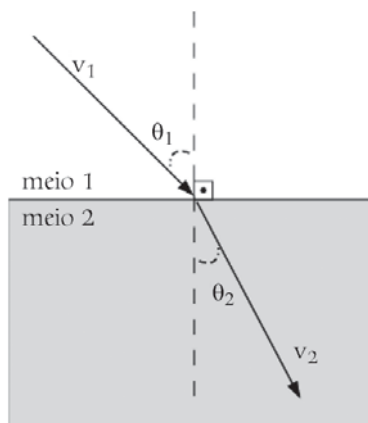


Figura 1: Refração de um raio de luz entre os meios 1 e 2, o índice de refração do meio 2 é maior do que o do meio 1.

Tabela 1: Valores de índice de refração do vidro comum para algumas cores. Extraído da Ref. [19].

Cor aproximada	Comprimento de onda no vácuo (nm)	Índice de refração
Vermelho	660	1,520
Laranja	610	1,522
Amarelo	580	1,523
Verde	550	1,526
Azul	470	1,531
Violeta	410	1,538

dar de meio a refração ocorrerá nos dois raios, sendo que cada um mudará de direção de forma diferente. Assim, deixarão de percorrer o caminho paralelamente e a separação entre eles será maior, ou menor, quanto maior for a distância percorrida após a refração. Observando-se na Tabela 1 os valores dos índices de refração da luz do vidro comum para cada cor, vemos que a diferença de refringência de uma cor para outra é da ordem de centésimos – a diferença entre os índices de refração do violeta e do vermelho é de apenas 0,018.

Então, para preparar uma demonstração eficiente da refração da luz branca, deve-se ter um recipiente transparente e longo contendo um material de índice de refração maior que o do ar e transparente, iluminado por uma luz branca e intensa. Após a luz sair do recipiente, ela deve incidir sobre um anteparo, com as cores separadas, para formar o padrão de refração (vide Fig. 2). Vemos que o padrão é formado por faixas contíguas de várias cores. Do lado esquerdo temos a cor vermelha e do lado direito temos a cor azul. Entre eles temos laranja, amarelo, verde e outras tonalidades intermediárias. Esse padrão é chamado de dispersão da luz branca.

### Prismas

Na literatura e na internet são encontradas propostas de experimentos para demonstrar a refração da luz branca. Geralmente, é utilizado um prisma de vidro ou de acrílico [20, 21], produtos comerciais. Também são descritos outros experimentos que usam os prismas caseiros [22-26].

Apresentamos oito tipos de prismas, descritos de forma reduzida na Tabela 2. Na construção dos prismas caseiros foi utilizada a cola epóxi de secagem rápida (bicomponente).

O primeiro tipo é um produto comercial. O prisma de acrílico, AcB, (vide Fig. 3a) é um bloco de acrílico com perfil no formato de um triângulo equilátero (vide Fig. 3b). Cada face tem lado de 33 mm e altura mínima de 42 mm, chegando até 58 mm. O prisma utilizado tem o topo chanfrado.

Na Fig. 4, vemos um raio de luz branca, incidindo no prisma pelo lado esquerdo, que sofre refração na interface ar-acrílico, depois percorre o interior do prisma até atingir a segunda interface, e sofre a segunda refração na interface acrílico-ar. Por último, a luz refratada incide sobre um anteparo onde irá formar o padrão de refração (Fig. 2).

A caixa plástica [23] (CxA) tem forma retangular (Fig. 5.a), é de plástico rígido e transparente, de dimensões 75 mm × 140 mm × altura 50 mm. O material não deve distorcer a imagem vista através dela. Inclínamos a caixa (Fig. 5.b) e colocamos água até atingir a borda. Iluminamos a caixa de cima para baixo e a luz refratada nela forma um padrão no piso.

O segundo tipo utiliza uma bandeja de plástico [12, 22, 26], BJA, (ou tigela) e um espelho plano (vide Fig. 6.a); colocamos água sem encher, posicionamos o espelho plano apoiado na borda, parte do espelho para fora e outra dentro d'água. As dimensões da bandeja utilizada são: 115 mm × 155 mm × altura 55 mm. As dimensões do espelho são 90 mm ×

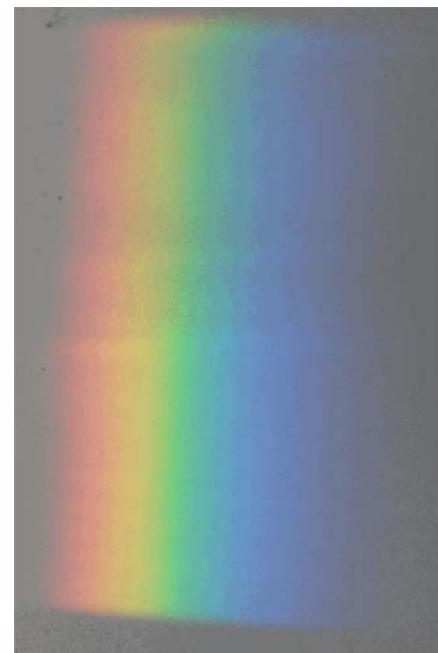


Figura 2: Padrão de refração de luz branca.



Tabela 2: Descrição dos prismas utilizados.

Código	Material	Dimensões (mm)	Conteúdo
AcB	acrílico	lado: 33, e altura mínima de 42 até 58.	acrílico
BjA	bandeja e espelho plano	bandeja: 115 × 155 × altura 55; espelho: 90 × 80.	água
CdFp	capa CD/DVD	lado: 20 × 50, base: 30 × 40.	água
CdFg	capa CD/DVD	lado: 30 × 50, base: 30 × 40.	água
CxA	caixa plástica	75 × 140 x altura 50	água
EbA	plástico de embalagem	lado: 55 × 70, base: 66 × 76.	água
EbF	plástico de embalagem	lado: 30 × 50; base: 30 × 40.	água
VdA	vidro	lado: 45 × 70, base: 60 × 70.	água

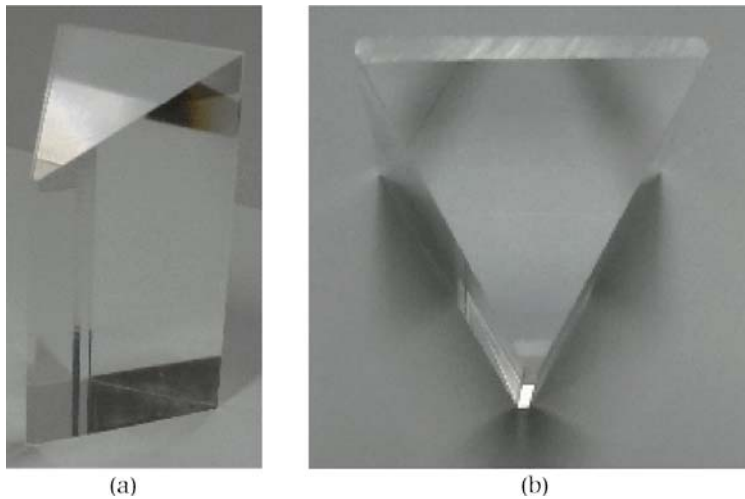


Figura 3: Prisma de acrílico (AcB). (a) Vista total. (b) Perfil do prisma.

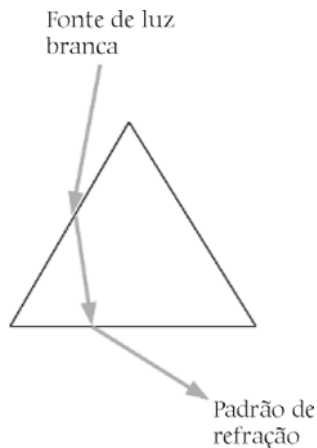


Figura 4: Raio de luz percorrendo um prisma com perfil de triângulo equilátero.

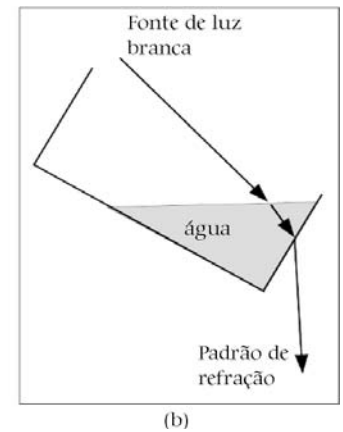
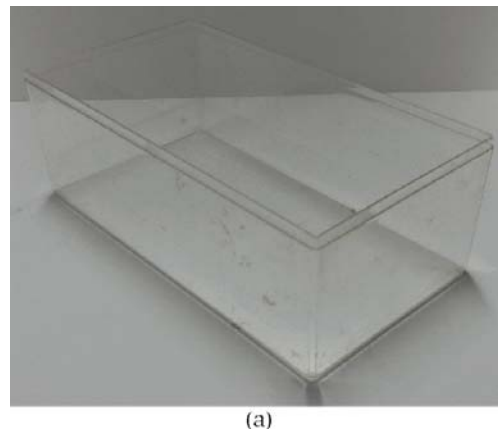
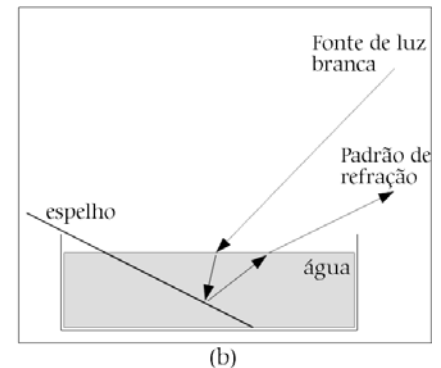
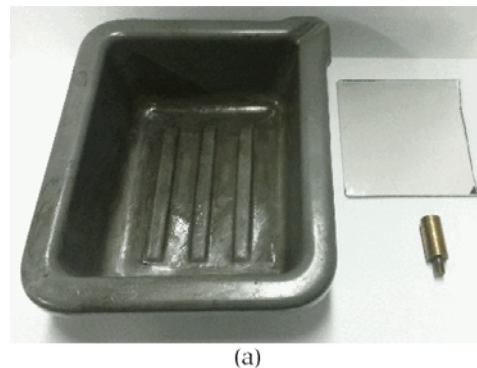


Figura 5: Caixa de plástico transparente (CxA). (a) Imagem da caixa. (b) Esquema da refração.

Figura 6: Prisma composto por bacia e espelho (BjA). (a) Bacia com um espelho plano e uma peça metálica. (b) Esquema da refração.



80 mm. Também utilizamos uma peça metálica para apoiar o espelho dentro da bandeja, senão o espelho deslizava e ficava totalmente submerso. O raio de luz branca incide na água (vide Fig. 6.b), sofre a refração na interface ar-água, prossegue até o espelho, reflete, sobe até a interface água-ar onde refrata, depois incide em um anteparo onde forma o padrão de refração.

O prisma de vidro (VdA) [24, 25] foi construído com três placas de vidro (cada uma com 45 mm × 70 mm), coladas pelas laterais formando um triângulo equilátero (Fig. 7). Adicionamos uma base de plástico de cor preta, 60 mm × 70 mm de plástico rígido (capa de CD/DVD). O prisma foi preenchido com água até a altura perto da borda superior.

Agora apresentamos alguns modelos de prisma que utilizam materiais diferentes e mais simples do que a lâmina de vidro. Os materiais são plásticos de três tipos: plástico transparente de embalagens (vide Fig. 8.a); plástico preto e transparente de capa de CD/DVD (vide Fig. 8.b)

A partir desses materiais são cortadas as peças que formarão os prismas cujas bases têm formato de triângulo equilátero, eles são formados por três placas iguais mais uma base, no caso do prisma aberto (EbA), e em alguns outros casos, por base e tampa, os prismas fechados

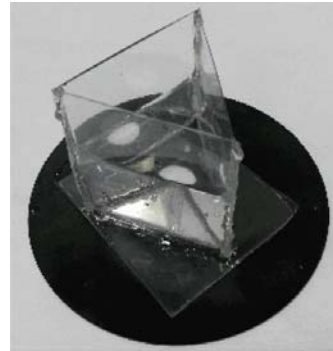


Figura 7: Prisma de vidro (VdA).

(CdFp, CdFg, EbF). Todos seguem o funcionamento descrito no esquema descrito na Fig. 4. Para unir as peças foi utilizado um adesivo epóxi bicomponente e de secagem rápida (10 min), após a mistura dos componentes. Os prismas foram preenchidos com água.

Em geral, o plástico de embalagem é mais macio do que o plástico de capa de CD/DVD, e pode ser cortado por uma tesoura. A capa de CD/DVD deve ser cortada com um estilete cuidadosamente. As peças de plástico preto são mais macias do que as de plástico transparente então são mais fáceis de cortar, enquanto as capas transparentes requerem mais cuidado para não quebrar (vide Anexo A). O plástico preto pode ser usado na base por onde não passa luz.

Com o plástico de embalagem, foram construídos dois prismas, cada um com três lâminas de plástico transparente para formar as laterais, que foram coladas em formato de um triângulo equilátero. O maior e aberto (EbA, Fig. 9.a) tem os lados com a medida de 55 mm × 70 mm com a base de 66 mm × 76 mm. Como esse ma-



(a)



(b)

Figura 9: Prismas feitos de plástico de embalagem e preenchidos com água. (a) Prisma aberto (EbA). (b) Prisma fechado (EbF).

terial é muito flexível, colamos tudo sobre um disco de plástico preto mais rígido e depois colocamos água. O segundo prisma de plástico de embalagem (EbF, Fig. 9.b) tem lado de 30 mm × 50 mm e a base e o topo de 30 mm × 40 mm. Antes de colar o topo, esse prisma foi preenchido com água. A presença de algumas bolhas de ar não afeta os experimentos.

Com o plástico de capa de CD/DVD foram construídos dois prismas, cada um constituído por três lâminas de plástico transparente, mais uma base e um topo (para fechar completamente). Após colados os lados, temos um prisma triangular equilátero. A base é colada, e após secar, o prisma é preenchido com água. Em seguida é colada a tampa. O menor (CdFp) tem três peças de 20 × 50 mm de lado e base/tampa de 30 mm × 40 mm. De formato semelhante, temos o prisma CdFg que tem 30 × 50 mm de lado e base/tampa de 30 mm × 40 mm. Seguimos o mesmo procedimento de construção. Todos têm aparência semelhante ao prisma EbF (vide Fig. 9.b)

### Iluminação

O experimento utiliza uma fonte de luz branca que ilumina o prisma (Fig. 4).

A luz refratada é projetada sobre um anteparo (parede ou folha de papel) em local sombreado, isto é, não recebe luz direta da fonte de luz. No anteparo, veremos a decomposição da luz branca, o padrão de refração da luz (Fig. 2).

As fontes de luz branca podem ser:

- O Sol;
- Uma lanterna de LED, utilizamos uma lanterna com 6 LED (Fig. 10);
- Uma lâmpada dicroica, com rosca padrão E27 (Fig. 11).

A luz do Sol é a ideal, porque os raios de luz são paralelos, ou seja, é colimada, condição para se obter o padrão de refração. Quando possível, utilizar a luz solar que entra por alguma janela, pois é preciso ter uma sombra para projetar o padrão de refração.

As outras alternativas também necessitam de uma região com sombra. Não é preciso a escuridão total. A luz que entra pela janela ou porta não pode ser mais intensa que a da fonte de luz utilizada.

A lanterna de LED é portátil e pode usar pilhas ou uma bateria recarregável. Uma alternativa melhor do que a lanterna é usar um abajur com uma lâmpada dicroica. Em geral essa opção ilumina mais que uma lanterna, porém a lâmpada dicroica com rosca E27 não é fácil de encontrar no comércio e é mais cara que uma lanterna de LED.

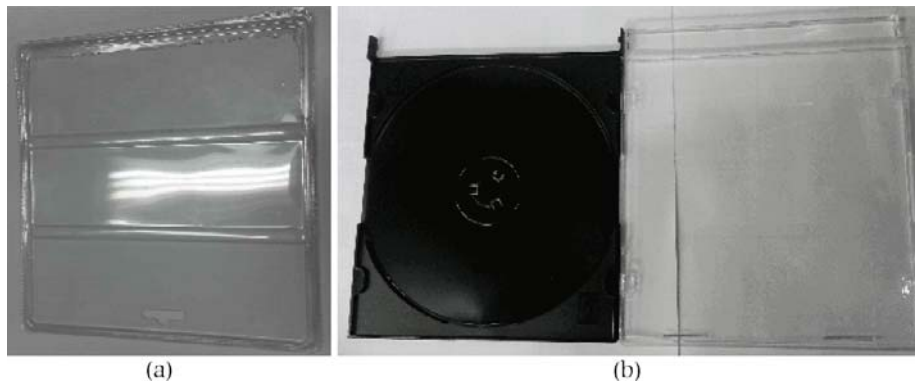


Figura 8: Materiais plásticos utilizados. (a) Plástico transparente de embalagens (b) Plástico de capa de CD/DVD, preto e transparente.



Figura 10: Lanterna de 6 LED.

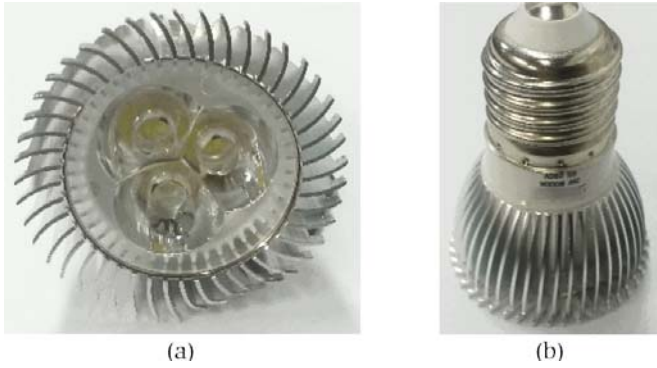


Figura 11: Lâmpada dicroica. (a) Frente. (b) Lateral.

### Experimentos

Basicamente os experimentos consistem em observar a formação do padrão de refração da luz branca, após um feixe de luz branca atravessar o prisma e sofrer a refração.

Montamos o prisma BJA (Fig. 6) no chão abaixo de uma janela iluminada pela luz do Sol. O padrão de refração aparece

projetado na parede, também abaixo da janela, vide Fig. 12.a. O padrão de refração registrado (Fig. 12.b) foi em um momento de intensidade mais tênue da luz, pois a intensidade da luz do Sol estava saturando a câmera. É preciso ajustar a inclinação do espelho para que o padrão seja projetado na parede. Esse experimento depende também do ângulo de incidência da luz do Sol pela janela.

Montamos o prisma CxA (Fig. 5) na beirada de uma janela iluminada pela luz do Sol. O padrão de refração aparece projetado no chão, vide Fig. 13.a, o círculo vermelho marca a posição do padrão de refração. O padrão (Fig. 13.b) apareceu em uma região de sombra das molduras da janela, no centro do padrão aparece uma região branca que é a sobreposição de vários padrões de refração que se com-

binam formando a cor branca. Quando a região de iluminação é limitada com uma folha de papel o padrão torna-se como o da Fig. 12.b. Para entender melhor isso, esquematizamos a soma de alguns padrões de cores [6] na Tabela 3. As quatro primeiras linhas representam um padrão espectral com 4 cores (Az, Vd, Am, Vm), cada um deslocado da linha acima, referente às diferenças de desvio para diferentes raios de luz. A última linha expressa a soma das cores das linhas anteriores devido à sobreposição de espectros.

A caixa de plástico utilizada era a embalagem de um produto. Verificamos que não é fácil comprar uma caixa nova, mesmo que seja a embalagem de algum produto. Outra dificuldade é manter a caixa inclinada e projetar o padrão de refração em alguma área sombreada.

Não conseguimos obter o padrão de refração quando colocamos o prisma VdA diretamente sob a luz do Sol. O prisma VdA é aberto, logo não é possível incliná-lo facilmente para ajustar ao ângulo de incidência da luz e conseguir projetar o padrão em região de sombra. Usamos um espelho plano (Fig. 14.a) para projetar um feixe de luz na parede, e colocando o prisma no caminho obtivemos o padrão (vide Fig. 14.b). O mesmo ocorreu com o prisma EbA.

Na Fig. 15 temos o esquema da luz ao atravessar os prismas de água, consideramos que a espessura das paredes seja

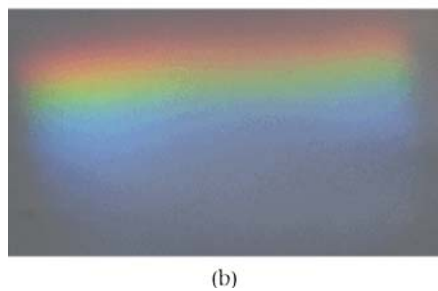


Figura 12: Experimento com o prisma BJA sob a luz do Sol. (a) O experimento. (b) O padrão de refração projetado na parede.

Tabela 3: Tabela com a soma de padrões de cores [6]. Legenda: Az = azul, Vd = verde, Am = amarelo, Vm = vermelho, Ci = ciano, Br = branco e Lr = laranja.

Az	Vd	Am	Vm				
	Az	Vd	Am	Vm			
		Az	Vd	Am	Vm		
			Az	Vd	Am	Vm	
				Az	Vd	Am	Vm
Az	Ci	Br	Br	Br	Am	Lr	Vm

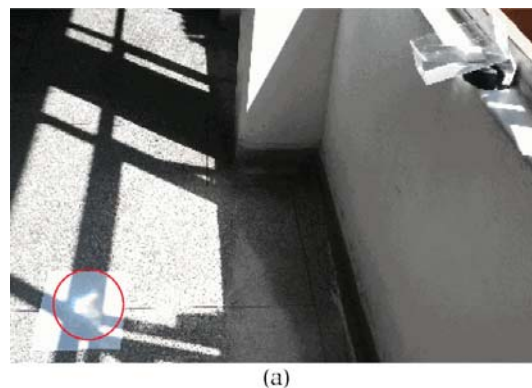
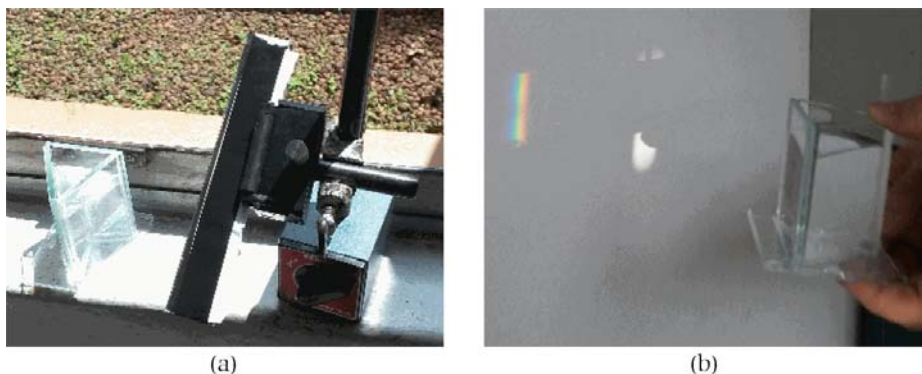


Figura 13: Experimento com CxA sob a luz do Sol. (a) Imagem do experimento. (b) O padrão de refração, dentro do círculo vermelho em (a).





de luz paralelos. O Sol está tão longe da Terra que temos essa condição naturalmente. Além disso, para obtermos um pa-

Figura 14: Experimento com VdA sob a luz do Sol. (a) O prisma e o espelho em um suporte. (b) O prisma com o padrão de refração.

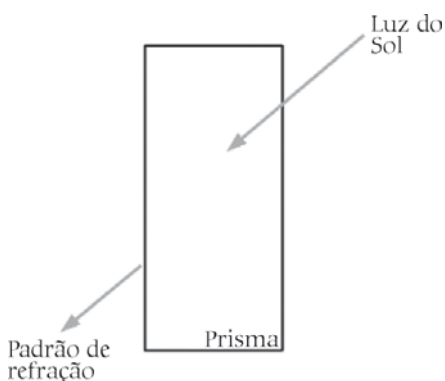


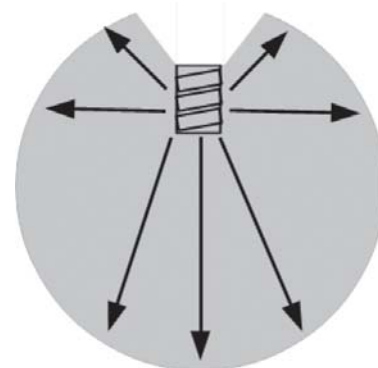
Figura 15: Esquema de iluminação do prisma, visto de perfil, com luz do Sol.

pequena e qualquer efeito causado por elas pode ser desprezado. A luz incide por uma das faces e sai pela outra face, caminhando de cima para baixo. Acreditamos que seja necessário haver uma altura mínima para isso ocorrer. Os prismas abertos não são adequados pois não permitem direcionar facilmente as faces do prisma na direção da luz do Sol. Com isso, não é tão fácil projetar o padrão de refração em local de sombra.

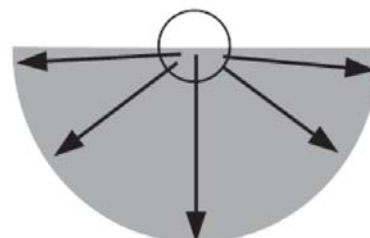
Na Fig. 16 temos as imagens dos experimentos com os prismas AcB, EbF e CdFp. Orientamos os prismas para que a

luz incidisse perto de uma quina. A luz atravessa o prisma e sai pela face oposta à quina, perto de outra quina, o que maximiza o percurso dentro do prisma e favorece a dispersão da luz. Nas fotos temos o padrão de refração projetado em folha de papel. O padrão gerado pelo prisma EbF (Fig. 16.b) é distorcido e não vemos as cores facilmente, vide o círculo vermelho na foto. No caso dos prismas AcB e CdFp (Figs. 16.a e 16.b) obtemos padrões diferentes, vemos o padrão mais nítido e as cores do padrão. Os três prismas podem ser inclinados, o que facilita projetar o padrão em região de sombra perto da janela. O tamanho dos prismas favorece o manuseio e o transporte.

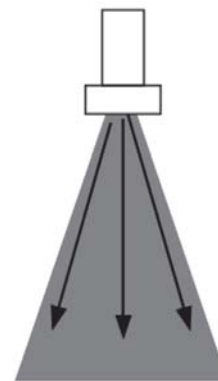
Tentamos utilizar as lâmpadas fluorescente (Fig. 17.a) e de LED (Fig. 17.b), mas a luz é espalhada por uma região grande, logo a intensidade da luz é baixa. O feixe de luz da lanterna de LED ou da lâmpada dicroica geralmente é direcionado (Fig. 17.c), isto é, os raios de luz não se espalham para os lados nem para trás. Logo, a intensidade na região iluminada é maior. Porém, os raios de luz não são paralelos entre si, isto é, não estão colimados. Se tivermos uma distância grande entre a fonte de luz e o prisma (FP, vide Fig. 18), podemos considerar que temos os raios



(a)



(b)



(c)

Figura 17: Esquema de iluminação de fontes de luz, as setas indicam os raios de luz. (a) Lâmpada fluorescente. (b) Lâmpada de LED. (c) Lanterna.

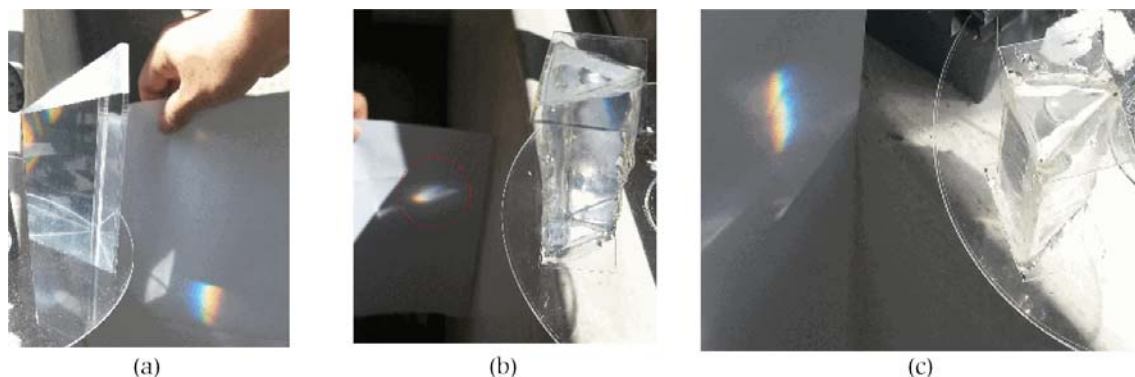


Figura 16: Fotos dos prismas de acrílico e plástico sob a luz do Sol. (a) Prisma AcB. (b) Prisma EbF. (c) Prisma CdFp.

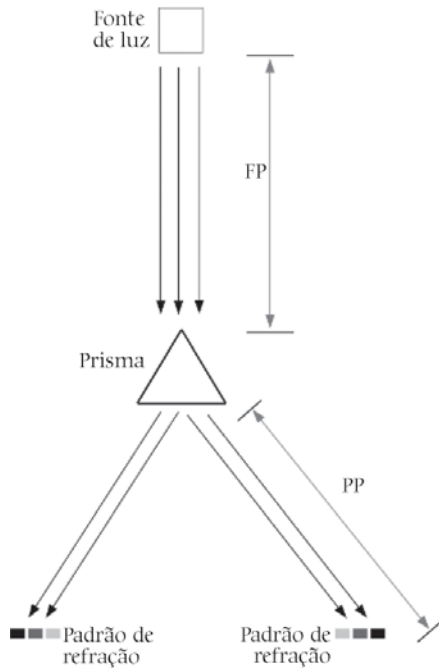


Figura 18: Esquema de iluminação de um prisma com uma lanterna ou uma lâmpada dicróica. FP é a distância da fonte de luz ao prisma. PP é a distância do prisma ao padrão de refração.

drão de refração precisamos de uma distância grande entre o prisma e a superfície onde é projetado o padrão (vide PP). Não apresentamos resultados com a lâmpada dicróica, apenas os resultados com a lanterna de LED, porque se funciona com a lanterna de LED, os resultados serão melhores com a lâmpada dicróica.

O local utilizado para os experimentos abaixo foi uma sala com luzes apagadas com incidência de luz externa pelas janelas sem cortinas ou persianas. A luz do dia entrava pelas janelas.

Ao iluminar o prisma AcB com a lanterna de LED (Fig. 19.a), obtemos o padrão de refração projetado sobre uma parede (Fig. 19.b). Usamos os valores  $FP = 1,30 \text{ m}$  e  $PP = 1,90 \text{ m}$ . Porém, o prisma com perfil triangular gera dois padrões de refração (Fig. 18), um para cada lado. Mas não havia espaço suficiente ao valor de PP para o outro lado. Na Fig. 20.a temos o prisma AcB visto do lado esquerdo, ao fundo e à direita, o padrão de refração (Fig. 20.b). Neste caso o padrão não está formado completamente, note que no centro está um azul bem claro, ao contrário do que aparece na Fig. 19.b. O padrão da Fig. 19.b está invertido em relação ao padrão da Fig. 20.b, no primeiro, a cor azul está à direita enquanto na segunda está à esquerda, como podemos ver na Fig. 18. O padrão depende da direção de saída do prisma, para a esquerda ou



(a)



(b)

Figura 19: Prisma de AcB iluminado por uma lanterna de LED. (a) O prisma e o padrão de refração ao fundo do lado direito. (b) O padrão de refração projetado.

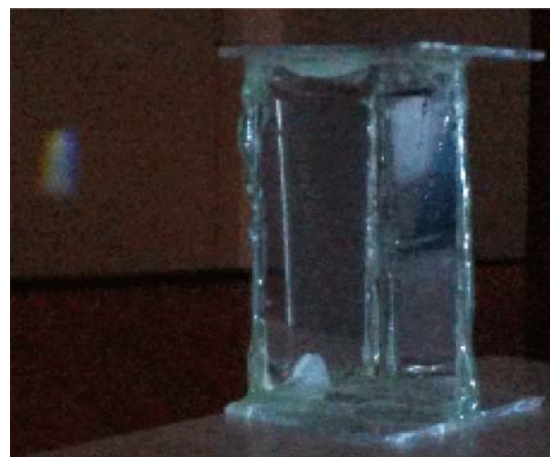


(a)



(b)

Figura 20: Prisma AcB iluminado por lanterna de LED visto por outro lado. (a) Prisma e o padrão de refração do lado esquerdo. (b) Padrão de refração.

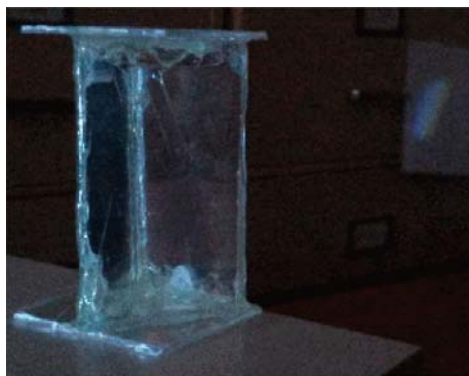


(a)



(b)

Figura 21: Prisma CdFg iluminado por lanterna de LED. (a) O prisma e o padrão de refração ao fundo, do lado esquerdo. (b) O padrão de refração.



(a)



(b)

Figura 22: Prisma CdFg iluminado pela lanterna de LED. (a) O prisma e o padrão de refração à direita na imagem. (b) O padrão de refração.

para a direita.

Ao iluminar o prisma CdFg com a lanterna de LED (Fig. 21.a) obtemos o padrão de refração projetado sobre uma parede (Fig. 21.b). Usamos os valores  $FP = 1,30$  m e  $PP = 1,90$  m. Porém, o prisma gera dois padrões de refração (Fig. 18). Na Fig. 22.a temos o prisma CdFg visto do lado esquerdo, ao fundo e à direita, o padrão de refração (Fig. 22.b). Neste caso o padrão não está formado

completamente, note que no centro está a cor azul bem claro, ao contrário do que aparece na Fig. 21.b.

Os experimentos usando os prismas AcB e CdFg são mais simples, tanto com a luz do Sol quanto com a lanterna de LED, e apresentam bons resultados. Os experimentos com a lanterna de LED são adequados na falta de luz do Sol.

Concluindo, vimos que a construção do prisma CdFg é uma alternativa à im-

possibilidade de comprar um prisma AcB. Além disso, a construção do prisma caseiro pode constituir-se como um passo dentro de uma atividade prática no processo de aprendizado do aluno. Os materiais utilizados neste trabalho podem ser adquiridos no comércio, não constituindo um empecilho, exceto a lâmpada dicróica, que é encontrada apenas em lojas especializadas em iluminação. A portabilidade do prisma e da lanterna é outro ponto favorável a essa alternativa.

Reforçamos algumas observações que ajudarão a obter o padrão de refração:

- A onda luminosa incidente deve ser paralela ou colimada, condição natural da luz solar. Com as fontes artificiais chega-se a essa condição afastando a lanterna ou lâmpada;
- Incidir a onda luminosa pelo vértice do prisma, como mostramos no desenho da Fig. 18;
- Posicionar o anteparo o mais longe possível do prisma;
- Aumentar o caminho percorrido pela luz aumenta a separação angular entre as faixas coloridas.

### Anexo A – Corte de Material

O corte de alguns materiais exige cuidados, como a capa de CD/DVD que é rígida. As bordas das capas dificultam o corte da placa, vide Fig. 23.a.

Primeiro é preciso retirar as bordas da capa. Usando um estilete, faça um corte perto de cada borda, no início suavemente para marcar a trajetória, depois repasse o estilete algumas vezes com mais força sobre os primeiros cortes. Depois faça cortes profundos em alguns

pontos nas bordas para ajudar a quebrar, perto dos cortes internos. Repita o procedimento na outra face da capa.

Force as bordas para que quebrem nos cortes feitos com o estilete. Segurando cada lado ao longo dos cortes, o material deve quebrar seguindo os cortes. O resultado deve ser parecido com o da Fig. 23.b. Nem sempre o procedimento funciona plenamente, veja que aparecem alguns trincos, e as bordas podem ter pontas e/ou ficarem

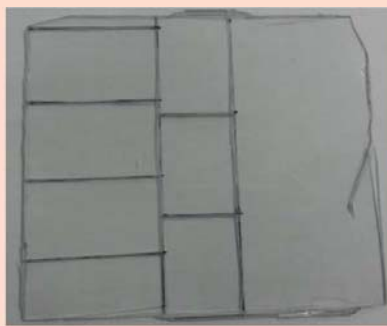
ásperas.

Sem as bordas, marque nos plásticos as peças nas medidas necessárias. Novamente passe o estilete suavemente para começar a marcar a placa. Depois, passe o estilete forçando. Repita no outro lado da tampa. Nas bordas, faça cortes profundos.

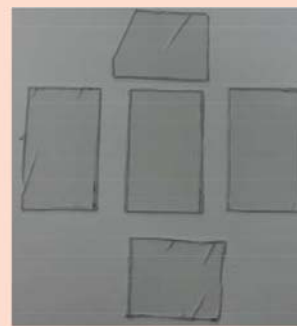
Quebre as peças soltando-as da placa (Fig. 23.c). Retire as pontas e alise as bordas com o estilete. Agora estão prontas para a montagem do prisma.



(a)



(b)



(c)

Figura 23: Corte da capa de CD/DVD. (a) Capa inteira. (b) Bordas removidas, desenho das peças com os cortes feitos. (c) As peças soltas.



## Referências

- [1] M. Rival, *Os Grandes Experimentos Científicos* (Ed. Jorge Zahar, Rio de Janeiro, 1997).
- [2] A.C. Raíck, L.O.Q. Peduzzi e J.A.P. Angotti, *Física na Escola* **15**, 24 (2017).
- [3] J.F.M. Rocha, *Eletr magnetismo e Ótica* (EDUFBA, Salvador, 2002).
- [4] F. Sears & M. Zemansky, *Física IV* (Ed. Pearson Education do Brasil, São Paulo, 2004), 10ª ed.
- [5] R. Crease, *Os Dez Mais Belos Experimentos Científicos* (Zahar, Rio de Janeiro, 2006).
- [6] I. Newton, *Óptica* (Ed. da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996).
- [7] P. Tipler, *Física* (Ed. LTC, Rio de Janeiro, 2000), 4ª ed.
- [8] <http://portaldoprofessor.mec.gov.br/fichaTecnicaAula.html?aula=33330>, acessado em 28/5/2018.
- [9] <http://portaldoprofessor.mec.gov.br/fichaTecnicaAula.html?aula=28379>, acessado em 25/5/2018.
- [10] [http://www.feiradeciencias.com.br/sala02/02\\_PC\\_03.asp](http://www.feiradeciencias.com.br/sala02/02_PC_03.asp), acessado em 25/5/2018.
- [11] <http://www.if.usp.br/gref/optica/optica2.pdf>, acessado em 24/4/2018.
- [12] R. Axt, *Caderno Catarinense de Ensino de Física* **7**, 225 (1990).
- [13] D. Soga, S.P. Toledo e M. Muramatsu, *Física na Escola* **15**, 45 (2017).
- [14] D. Soga, R.D. Paiva Jr., M.H. Ueno-Guimarães e M. Muramatsu, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **39**, e4506 (2017).
- [15] R.S.A. Omelczuck, D. Soga e M. Muramatsu, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **39**, e3602 (2017).
- [16] A. Campos, W.B. de Sousa e T.N. Souza, *Física na Escola* **15**, 41 (2017).
- [17] E. Hecht, *Óptica* (Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 2002), 2ª ed.
- [18] R.P. Feynman, R. Leighton e M. Sands, *Lições de Física de Feynman. Vol. 1: Edição Fefinitiva* (Ed. Bookman, Porto Alegre, 2008).
- [19] J. Cutnell, *Física*, v. 2 (Ed. LTC, Rio de Janeiro, 2006)
- [20] <https://www.youtube.com/watch?v=zUZqSkWWgkw>, acessado em 25/5/2018.
- [21] <https://www.youtube.com/watch?v=d8v4aMf2UIYE>, acessado em 25/5/2018.
- [22] <http://www2.fc.unesp.br/experimentosdefisica/opt11.htm>, acessado em 1/3/2018
- [23] [http://optifisis.blogspot.com.br/2012/07/experimento-en-clase\\_27.html](http://optifisis.blogspot.com.br/2012/07/experimento-en-clase_27.html), acessado em 23/2/2018.
- [24] <https://www.youtube.com/watch?v=BBmyHZ1Q5p0>, acessado em 8/5/2018.
- [25] <https://www.youtube.com/watch?v=2u8m12s2iEY>, acessado em 8/5/2018.
- [26] <https://www.youtube.com/watch?v=0d61oLH5rvA>, acessado em 4/5/2018.