

Carta do Editor

AFnE está de volta. Desde sua interrupção em 2012, muitas coisas aconteceram no ensino de física, como o abandono dos parâmetros curriculares nacionais (PCN) e de outras diretrizes governamentais que orientaram o desenvolvimento dos currículos; as tentativas de mudança na grade curricular do Ensino Médio; as reflexões acerca da Base Nacional Comum Curricular (<http://basenacionalcomum.mec.gov.br/documentos/bncc-2versao.revista.pdf>); a realização de diversos congressos e encontros sobre o ensino, a exemplo do II *World Conference on Physics Education* no Brasil; a consolidação do ENEM como porta única de acesso na maioria das instituições públicas de ensino superior; e a criação do Mestrado Nacional Profissional de Ensino de Física, mantido pela Sociedade Brasileira de Física com apoio da Capes (<http://www.sbfisica.org.br/~mnpef/>). Esses acontecimentos refletem o quanto a nossa área está crescendo e permeada por transformações.

Nesse sentido, a FnE retorna com a intenção manter a sua missão: discutir a formação e divulgação de informação sobre a física e o seu ensino, com ênfase na sala de aula, incluindo seções com pequenas mudanças no enfoque (<http://www.sbfisica.org.br/fne/>).

As novidades são a edição unicamente eletrônica, a página no Facebook e o canal do Youtube FnE. Os autores serão convidados a produzir e enviar vídeo próprio apresentando o teor de seus artigos, complementando com informações visuais relevantes. A FnE conta com nova equipe editorial formada por Giselle Watanabe (UFABC), Alexandre Tort (UFRJ), Breno Arsioli Moura (UFABC), Ildeu de Castro Moreira (UFRJ), responsável pela nossa página no Facebook, e Alexandre Gonçalves Pinheiro (UECE), e responsável

pelo nosso canal do Youtube. O Conselho Editorial encontra-se em fase de formação.

Nesse recomeço, são muitas as atrações. Em comemoração aos 100 anos da relatividade geral e a detecção das ondas gravitacionais pelo observatório americano LIGO, apresentamos o artigo de Daniel Vanzella e, pasmem, uma entrevista bem humorada com, ele mesmo, Albert Einstein, feita pelo Alexandre Medeiros e colegas, continuando a série de entrevistas com grandes vultos da ciência. Leonardo Vieira e Carlos Aguiar apresentam ideias criativas para uso de *tablets* e *smarphones* no estudo da mecânica e na seção *Faça você mesmo*, M. Lacerda e Toni Santos usam um aparato simples para verificar a lei do inverso do quadrado da distância. Na área de óptica, temos três interessantes artigos: o uso do *Google Maps* e *Google Earth* para tratar da óptica geométrica e os fenômenos de interferência e difração, respectivamente, por Jairo Ribeiro e Wagner Jardim, e a combinação de três poderosas ferramentas, *Arduino*, *Scratch* e *Tracker*, utilizadas no estudo das cores feito pela equipe da Marisa Cavalcante. A união de física e literatura é explorada por Graciela Watanabe e Graça Hosokawa por meio de atividades envolvendo contos de Machado de Assis e Guimarães Rosa. A visão do ensino de ciências praticado no Brasil nos anos 60, de Richard Feynman, na descrição de Osvaldo Frota-Pessoa, é analisada por Ildeu Moreira e Matheus Paiva no resurgimento da seção *Memórias da Física no Brasil*.

Esperamos que o leitor desfrute dessa seleção e que possa fazer parte das próximas edições.

Para submissão de artigos, leia as instruções no site da FnE e envie para fnefisicanaescola@gmail.com, Curta e comente na nossa página no Facebook.

Nelson Studart

Facebook: <https://www.facebook.com/fne2016fisicanaescola/?fref=ts>

Youtube: https://www.youtube.com/channel/UCDZjY4K2Z0GIlt_us4m4Bqg



.....
Graciella Watanabe

Faculdade de Educação, Universidade
 de Brasília, Brasília, DF, Brasil
 E-mail: gwatanabe@unb.br

.....
Graça Betânia Moraes Hosokawa

Escola Viva, São Paulo, SP, Brasil
 E-mail: grabeta1@hotmail.com

**Apresentando os contos:
 O espelho**

A crítica especializada em estudar Machado de Assis e Guimarães Rosa já analisou, em diversos contextos, as possibilidades de existir um diálogo entre os textos intitulados *O espelho* [1]. Alguns estudiosos afirmam ser o texto de Guimarães Rosa uma resposta ao conto de Machado de Assis. Esse debate se mostra enriquecedor no contexto escolar, no entendimento da produção das obras e possibilita uma abordagem dialógica entre modernismo e realismo brasileiro. Para tal efeito, no âmbito das leituras, defende-se que é possível perceber uma perspectiva mais significativa do primeiro quando o segundo já é conhecido, ou seja, entende-se melhor a interlocução do conto de Rosa uma vez que já tenha sido realizada a leitura de Machado.

Publicado pela primeira vez no ano de 1882, em *Papéis Avulsos* [2], o texto de Machado de Assis cria com maestria a história de um jovem que se torna alferes aos 25 anos e passa a ser conhecido como Nhô Alferes, Senhor Alferes, ou, O Alferes. Quando se vê sozinho, sem pessoas para nomeá-lo como tal, perde a identidade, revelada no texto como a perda da própria imagem no espelho. Essa imagem é recuperada quando a personagem veste a farda de alferes, embora se encontre em uma fazenda, sem estar cumprindo essa função. Talvez, por isso, o texto receba o nome de *O espelho – esboço de uma nova teoria da alma humana*.

O conto de Guimarães Rosa, publicado em 1962, faz parte de diversas narrativas encontradas no livro *Primeiras Estórias* [3]. Nele, o narrador, em primeira

pessoa, dialoga com um interlocutor, leitor culto, discutindo a própria existência humana, as muitas máscaras por detrás de um só homem, ou seja, a identidade da psique humana. Já no primeiro parágrafo faz menção ao conhecimento da física:

O senhor, por exemplo, que sabe e estuda, suponho nem tenha ideia do que seja na verdade – um espelho? De mais, decerto, das noções de física, com que se familiarizou, as leis da óptica.

A partir de experimentações, o narrador de Rosa quer ir além da máscara nele refletida, além do rosto externo, formado pelas impressões cristalizadas que ele tem de si próprio, construídas socialmente. Com esse intuito, observa-se no espelho com várias expressões – ira, alegria, tristeza, medo – a fim de apagá-las de sua imagem; o mesmo narrador faz em relação a outras impressões. Essas experimentações ocorrem por um tempo, até que, abandonadas, o narrador olha para o espelho e não vê nenhuma imagem definida, nada em que possa se reconhecer.

Anos mais tarde, ele volta a ver-se com um “ainda-nem-quase-rosto”. A partir de uma série de reflexões e indagações, o conto é finalizado e se encerra com uma pergunta – “Sim?” – possibilitando ao interlocutor fazer suas próprias conclusões.

No âmbito dos conhecimentos científicos que os contos abordam, em especial, no texto de Guimarães Rosa, ainda pouco é debatido nos estudos em ensino de física. A relevância da abordagem da ótica, em partes, pode ser entendida pela formação

Alguns estudiosos afirmam ser O espelho de Guimarães Rosa uma resposta ao conto do mesmo nome escrito por Machado de Assis. Esse debate se mostra enriquecedor no contexto escolar, e possibilita uma abordagem dialógica entre modernismo e realismo brasileiro

Os contos de Machado de Assis e Guimarães Rosa, intitulados *O espelho*, já foram amplamente discutidos na pesquisa em literatura no Brasil. No entanto, pouco desses textos é apresentado na sala de aula sob o ponto de vista da física. Neste artigo, propomos um diálogo entre duas disciplinas – literatura e física – a fim de agregar novas interfaces na aprendizagem de conteúdos disciplinares.

adquirida no curso de medicina frequentado pelo autor mineiro. Portanto, se reconhece que ambos possuem forte relação com a física e, no decorrer do conto, trazem muitos aspectos da ótica. A partir de uma articulação entre conhecimento literário e científico, busca-se nesse trabalho apresentar uma tentativa de abordar esse diálogo entre os contos de Machado e Rosa em uma atividade para o Ensino Médio através da interlocução entre conhecimentos inicialmente separados nas disciplinas escolares: física e literatura.

Para começo de conversa: motivações

Existe na área de ensino de ciências um forte apreço pelos trabalhos considerados de cunho cultural. Assim, toda possibilidade de inserção de temas que eram considerados *à priori* distantes das discussões científicas passaram, ao longo dos anos, a serem compreendidos como importantes instrumentos de contextualização e aprendizagem da própria ciência [4].

João Zanetic enfatiza que qualquer possibilidade de interlocução entre duas ou mais áreas do saber encaminha os jovens estudantes para estabelecer laços com o conhecimento, permitindo que a interação desses jovens com o mundo seja pautada em um diálogo inteligente, problematizando de forma crítica os saberes escolares e os saberes para além da sala de aula, como defendia Paulo Freire [5].

David Jou, estudioso das relações das ciências da natureza com as artes, ainda lembra que, mais do que tentar explicar os resultados da ciência, as manifestações artísticas possibilitam a compreensão do papel da ciência na sociedade e explica aos sujeitos, que não fazem parte desse contexto, a importância de seu conhecimento. O autor ainda defende que a física, mais do que ser uma máquina fria de cálculos, é um encontro de seres humanos com os limites pessoais e sociais de sua época [6].

No entanto, é Klaus Mecke quem nos indica uma nova forma de perceber a literatura e a física enquanto produtos culturais. Mecke propõe um olhar para a física além do conteúdo específico e impõe, aos que a ensinam, a apresentação de sua face filosófica, histórica e cultural. O autor acredita que é possível ensinar a história da física utilizando a história da literatura [7].

Nesse contexto, o que parecia apenas a amizade, iniciada na sala dos professores, entre a professora de física e a de literatura, do Ensino Médio, tornou-se uma possibilidade de exercício científico significativo, ainda mais que a relação entre

elas e os alunos do 3º ano do mesmo segmento, também, era de afeto. Cenário perfeito para investigações e descobertas, motivadas por essa relação e pelo desejo de trabalhar conteúdos complexos de maneira interessante e provocadora. Este trabalho é resultado da atividade desenvolvida a partir dos textos de Guimarães Rosa e Machado de Assis, trazendo para o contexto de sala de aula uma possibilidade de reflexão, para os alunos e para essas professoras, sob a legitimidade da ciência, o permeio filosófico de seu pensamento e o papel do conhecimento da ótica física no trabalho desses dois grandes nomes da literatura nacional.

Diálogos reflexivos na sala de aula

A atividade aqui relatada foi realizada na Viverde – Escola de Educação Básica, na cidade de Bragança Paulista. Os estudantes que participaram das atividades propostas foram alunos do 3º ano do Ensino Médio de duas turmas de aproximadamente 25 alunos cada. A escola Viverde é uma associada Pueri Domus. Portanto, o material utilizado nas aulas regulares é dessa editora e tem como característica uma abordagem reflexiva dos conteúdos, o que possibilitou a

elaboração de uma atividade que caminhasse nessa direção. No momento em que ela foi realizada, já haviam sido trabalhados os conteúdos de ótica, previstos na grade curricular do 3º ano, assim como os ligados ao realismo e ao modernismo, no cenário da literatura brasileira. Os alunos foram convidados a participar desse exercício em período fora do horário normal de aula, como atividade extracurricular. Participaram, aproximadamente, 85% de todos os alunos convidados.

Para iniciar a discussão, apresentamos aos alunos as intenções da atividade em grupo, como segue:

Caro(a)s aluno(a)s,
Esta atividade o(a)s convida à reflexão, a partir de um olhar poético-científico-filosófico, sobre a função física e metafísica do espelho, símbolo dos questionamentos sobre o eterno limiar entre a aparência e a essência do Brasil. Esperamos que este exercício lhes revele o quanto a arte e a ciência estão próximas, unidas, e cada uma cumpre, a seu modo, a função de nos constituir como sujeitos his-



Figura 1. René Magritte, La Reproduction Interdite, 1937 [10].

tóricos.

Este exercício será avaliado considerando os conhecimentos da física demonstrados nas respostas e sua capacidade argumentativa.

Boa leitura! Boa escrita!
Excelentes descobertas!

Em seguida, foi apresentado aos alunos o texto de Contardo Calligaris intitulado *A moda: belezas extremas e indecisas* [8], o fragmento da poesia de Álvaro de Campos/Fernando Pessoa de 1928, *Tabacaria* [9] e a obra de René Magritte sob o título de *La reproduction Interdite* de 1937 [10]. O intuito de apresentar esses textos e obra foi o de suscitar discussões nos grupos a fim de conduzi-los a uma reflexão mais profunda sobre as questões que seriam apresentadas em seguida.

A atividade

Ao término das primeiras discussões, foram apresentadas aos alunos 8 questões que envolviam o conteúdo de ótica, mais especificamente os estudos associados ao espelho. Também foram feitas perguntas relacionadas ao contexto do conto e que apresentaram, do ponto de vista filosófico, conexões com o próprio pensar da ciência. Finalmente, a questão que fecha o ciclo buscou, a partir dos conhecimentos em literatura, trazer uma reflexão sobre a possível interlocução entre os textos dos dois escritores brasileiros. Nas linhas que se seguem, demonstraremos as perguntas apresentadas aos estudantes com uma pequena discussão acerca de suas finalidades. Todas as questões iniciam-se com trechos retirados dos contos indicando M.A. para o trabalho de Machado de Assis e G.R. para Guimarães Rosa.

Nesse primeiro momento os estudantes se mostraram confusos, questionando as relações entre a física e a literatura. Nesse sentido, queriam saber como a proposta se mostrava significativa no ponto de vista da ciência. Os questionamentos foram considerados positivos, pois refletem, também na prática docente das autoras, um distanciamento até aquele momento de nossas conduções na sala de aula sobre temáticas particularmente disciplinares. Os alunos, curiosos, sentiram-se instigados a prosseguir e tentar compreender a proposta que as docentes traziam naquele contexto.

Um aspecto significativo ao tentar introduzir, sob o ponto de vista do conhecimento científico, as questões iniciais, tiveram por princípio debater questões consideradas mais simplificadas e diretas. Esse primeiro contato entre os alunos e as questões surtiram o efeito esperado de

promover de maneira pontual a relação entre a física e a literatura proposta na atividade. Pode-se perceber que os estudantes iniciaram os debates lembrando dos conceitos de ótica e aos poucos foram trazendo articulações com o contexto literário envolvido.

Assim, a apresentação das questões organizou-se em dois blocos: o primeiro direcionado à interpretação de texto, com prioridade na dimensão física do conteúdo; no segundo momento, foi solicitada aos estudantes uma reflexão mais profunda sobre a relação entre física e literatura, por meio de uma análise entre os dois contos.

A primeira pergunta teve como objetivo iniciar uma discussão sobre os conteúdos de ótica, redirecionando o grupo para o enfoque a ser dado durante as questões que se seguiam. Como resposta, esperava-se que o aluno discutisse a difusão e a ordenação no feixe de luz, assim como o papel da superfície (rugosa ou lisa) para a reflexão da luz:

O senhor, por exemplo, que sabe e estuda, suponho nem tenha ideia do que seja na verdade – um espelho? (G.R.)
Um espelho reflete totalmente (ou quase) a luz que nele incide, bem como uma parede branca. Em que diferem um espelho e uma parede branca então? Ou seja, o que é na verdade um espelho? De que ele é feito? Quais são as condições necessárias para que sua superfície seja refletora?

A segunda questão discute o *olhar* a alma sob dois pontos de vista (fora e dentro). Na pergunta que segue, propusemos que os alunos discutissem o que significa, do ponto de vista de uma definição conceitual, as imagens real e virtual. É importante salientar que o tema havia sido apresentado aos alunos em um momento que antecedeu as atividades. Apesar de não haver, para as docentes, uma resposta considerada correta, esperava-se que os alunos tivessem a capacidade de articular o contexto do conto com o papel das definições na ciência.

Nada menos de duas almas. Cada criatura humana traz duas almas consigo: uma que olha de dentro para fora, outra que olha de fora para dentro...

O autor cita duas maneiras diferentes de observar a alma. Discuta, a partir dos conceitos da física, quais devem ser a

imagem real e a virtual para essas duas definições: “(...) uma que olha de dentro para fora, outra que olha de fora para dentro... (M.A.)

A terceira questão traz, a partir das discussões de Rosa, uma possível forma de avaliar o que seria um espelho honesto, ou seja, um espelho que não modifica a imagem (espelho plano). Em seguida, propusemos aos alunos uma reflexão sobre o que distingue a imagem do objeto.

O espelho, são muitos, captando-lhe as feições; todos refletem-lhe o rosto, e o senhor crê-se com aspecto próprio e praticamente imudado, do qual lhe dão imagem fiel. Mas – que espelho? Há-os “bons” e “maus”, os que favorecem e os que detraem; e os que são apenas honestos, pois não. E onde situar o nível e ponto dessa honestidade ou fidedignidade? Como é que o senhor, eu, os restantes próximos, somos, no visível? (G.R.)
Dentre os espelhos estudados, quais são “honestos”, ou seja, quais refletem imagens fiéis dos objetos?

O trecho do conto de Machado de Assis indica uma multiplicação de almas segundo o reflexo do espelho. A proposta feita aos estudantes era discutir sobre as maneiras, segundo a física, de se multiplicar as imagens. Nesse sentido, também foi esperado que os estudantes trouxessem discussões acerca das diferenças associadas aos distintos “reflexos” da literatura e os reflexos da física.

Pela minha parte, conheço uma senhora, – na verdade, gentilíssima, – que muda de alma exterior cinco, seis vezes por ano. Durante a estação lírica é a ópera; cessando a estação, a alma exterior substitui-se por outra: um concerto, um baile do Cassino, a Rua Ouvidor, Petrópolis... (M.A.)

Considerando que a alma, segundo o narrador, pode ser o reflexo do espelho, que maneira física você utilizaria para multiplicar a “alma humana”? Com este artifício você poderia adquirir infinitas almas?

Na questão que se segue, procuramos instigar os alunos a pensar em outras for-

mas possíveis de reflexão que não somente o espelho plano, do contexto do conto.

“A realidade das leis físicas não permite negar que o espelho reproduziu-me textualmente, com os mesmos contornos e feições;...” (M.A.)

Discuta, a partir das reflexões das aulas de física, quais tipos de espelhos produzem imagens com “os mesmos contornos e feições”.

A questão seguinte pediu ao estudante que discutisse sobre ausência de luz e sua reflexão. Buscou-se, nesse momento, articular a relação entre conhecimento cultural e o saber científico. Tinha-se a pretensão de que os estudantes pudessem trazer algumas considerações da ciência para percepções ditas populares.

O espelho inspirava receio supersticioso aos primitivos, aqueles povos com a ideia de que o reflexo de uma pessoa fosse a alma. Via de regra, sabe-o o senhor, é a superstição fecundo ponto de partida para a pesquisa. A alma do espelho - anote-a - esplêndida metáfora. Outros, aliás, identificavam a alma com a sombra do corpo; e não lhe terá escapado a polarização: luz-treva. (G.R.)

No campo das ideias supersticiosas populares, para uns, o reflexo de uma pessoa é sua alma, mas, para outros, a sombra é que é a alma. E no campo científico, o que são o reflexo e a sombra?

Na questão seguinte foi sugerida uma discussão sobre a decodificação e a reprodução das imagens no processo neurológico dos seres humanos. O tema apresentado foi trabalhado em sala de aula em momento anterior à atividade.

Por começo a criancinha vê os objetos invertidos, daí seu desajeitado tatear; só a pouco e pouco é que consegue retificar, sobre a postura dos volumes externos, uma precária visão. (G.R.)

Por que a criancinha vê os objetos invertidos? E nós, não os vemos invertidos por quê?

Finalmente, a última questão teve a intenção de possibilitar aos grupos algo que lhes era peculiar, a defesa de um ponto de vista, uma vez que não havia resposta sim ou não, mas um espaço para discutir e argumentar. Esta questão foi a única que não abordou conceitos específicos de ótica e, como os alunos sempre diziam durante as aulas de português, eles puderam “viajar” na construção da resposta, respeitando os limites indicados pelos textos.

“(…)Quando nada acontece, há um milagre que não estamos vendo. (...) Os olhos, por enquanto, são a porta do engano; duvide deles, dos seus, não de mim.” (G.R.)

“(…) Os fatos explicarão melhor os sentimentos: os fatos são tudo.” (M.A.)

Considerando os fragmentos acima, é possível afirmar que existe uma incoerência entre os textos de Machado e de Rosa. A partir da leitura realizada pelo grupo, apresente uma relação possível entre essas ideias, mostrando pontos de contato e/ou discordância.

Se, no começo, os alunos se mostraram receosos em relação aos conteúdos de física e à proposta de um olhar a partir dos textos literários, percebeu-se que, ao longo das atividades, questões mais complexas foram sendo produzidas, tornando-se necessária a intervenção tanto da docente de literatura como da de física. Quando os alunos começaram a fazer as conexões e perceber que poderia haver dimensões ainda inexploradas até pelas docentes, sentiram-se instigados a discutir e aprofundar as questões, como o sentido do espelho para os autores ou os motivos do uso dos conhecimentos da ótica por Guimarães Rosa em seu texto.

Descobertas

Os dois campos do saber – ciência e literatura – são importantes instrumentos de aprendizagem quando apresentados como complementares para os estudantes da escola básica. Assim, a maneira de lidar com o texto literário pode ser modificada quando o sujeito que o lê, de certa forma, reconhece presentes nele elementos do conteúdo físico. Ao entender esse conhecimento em um contexto maior, o aluno pode perceber que a ciência é uma

forma de expressão e construção da realidade. Esse tipo de relação implica em olhar a literatura e a ciência como instrumentos da criação humana, diferentes em seus aspectos de criação e linguagem, mas próximos por suas procuras mais primordiais como questionamentos sobre nossa existência.

A atividade apresentada neste trabalho foi avaliada sob dois olhares – da física e da literatura – procurando, na interface com essas duas formas do saber, criar vínculos afetivos com o próprio conhecimento. Tal afetividade não se caracteriza pela relação ingênua do “gostar da ciência ou da literatura”, mas fazer-se entender uma ciência não tão distante do escritor, e ao mesmo tempo, uma literatura que se próxima em muitos aspectos da física.

Assim, a intervenção com os alunos se mostrou positiva, pois os próprios estudantes demonstraram surpresa pela relação estabelecida entre esses dois campos do conhecimento. Tal reflexão possibilitou que outras instâncias da física pudessem ser abordadas no contexto escolar e, conseqüentemente, que fossem criadas novas possibilidades de aprendizagem e de leitura do texto artístico.

Agradecimentos

Gostaríamos de agradecer às Profas. Rosane Acedo Vieira, Maria Regina Zago Leite da Silva e Viviane Moraes Alves, pelas indicações e sugestões durante o percurso do trabalho.

Referências

- [1] Edna Maria E.S. Nascimento e Maria Célia Leonel, *Revista Anpoll* 2, 24 (2008).
- [2] Machado de Assis, in: *Machado de Assis: Contos* (Agir, Rio de Janeiro, 1973).
- [3] João Guimarães Rosa, *Primeiras Estórias* (José Olympio, Rio de Janeiro, 1972).
- [4] Ana M. Menezes e Andréia G. de Moraes, in: *Anais do XVIII Simpósio Nacional de Ensino de Física*, Vitória (2009).
- [5] João Zanetic, *Ciência e Cultura* 57, 3 (2005).
- [6] Daniel Jou, in: *Física de Cada Dia* (Sabadell, Madrid, 2007).
- [7] Klaus R. Mecke, *Gazeta de Física* 27, 4 (2005).
- [8] Contardo Calligaris, *Terra de Ninguém* (Publifolha, São Paulo, 2004).
- [9] Fernando Pessoa, *Obra Poética* (Ed. Aguilar, Rio de Janeiro, 1981).
- [10] René Magritte, *La Reproduction Interdite*, in: *Museu Boymans-van-Beuniguem*, Rotterdam, 1937.



.....
Graciella Watanabe

Faculdade de Educação, Universidade
 de Brasília, Brasília, DF, Brasil
 E-mail: gwatanabe@unb.br

.....
Graça Betânia Moraes Hosokawa

Escola Viva, São Paulo, SP, Brasil
 E-mail: grabeta1@hotmail.com

**Apresentando os contos:
 O espelho**

A crítica especializada em estudar Machado de Assis e Guimarães Rosa já analisou, em diversos contextos, as possibilidades de existir um diálogo entre os textos intitulados *O espelho* [1]. Alguns estudiosos afirmam ser o texto de Guimarães Rosa uma resposta ao conto de Machado de Assis. Esse debate se mostra enriquecedor no contexto escolar, no entendimento da produção das obras e possibilita uma abordagem dialógica entre modernismo e realismo brasileiro. Para tal efeito, no âmbito das leituras, defende-se que é possível perceber uma perspectiva mais significativa do primeiro quando o segundo já é conhecido, ou seja, entende-se melhor a interlocução do conto de Rosa uma vez que já tenha sido realizada a leitura de Machado.

Publicado pela primeira vez no ano de 1882, em *Papéis Avulsos* [2], o texto de Machado de Assis cria com maestria a história de um jovem que se torna alferes aos 25 anos e passa a ser conhecido como Nhô Alferes, Senhor Alferes, ou, O Alferes. Quando se vê sozinho, sem pessoas para nomeá-lo como tal, perde a identidade, revelada no texto como a perda da própria imagem no espelho. Essa imagem é recuperada quando a personagem veste a farda de alferes, embora se encontre em uma fazenda, sem estar cumprindo essa função. Talvez, por isso, o texto receba o nome de *O espelho – esboço de uma nova teoria da alma humana*.

O conto de Guimarães Rosa, publicado em 1962, faz parte de diversas narrativas encontradas no livro *Primeiras Estórias* [3]. Nele, o narrador, em primeira

pessoa, dialoga com um interlocutor, leitor culto, discutindo a própria existência humana, as muitas máscaras por detrás de um só homem, ou seja, a identidade da psique humana. Já no primeiro parágrafo faz menção ao conhecimento da física:

O senhor, por exemplo, que sabe e estuda, suponho nem tenha ideia do que seja na verdade – um espelho? De mais, decerto, das noções de física, com que se familiarizou, as leis da óptica.

A partir de experimentações, o narrador de Rosa quer ir além da máscara nele refletida, além do rosto externo, formado pelas impressões cristalizadas que ele tem de si próprio, construídas socialmente. Com esse intuito, observa-se no espelho com várias expressões – ira, alegria, tristeza, medo – a fim de apagá-las de sua imagem; o mesmo narrador faz em relação a outras impressões. Essas experimentações ocorrem por um tempo, até que, abandonadas, o narrador olha para o espelho e não vê nenhuma imagem definida, nada em que possa se reconhecer.

Anos mais tarde, ele volta a ver-se com um “ainda-nem-quase-rosto”. A partir de uma série de reflexões e indagações, o conto é finalizado e se encerra com uma pergunta – “Sim?” – possibilitando ao interlocutor fazer suas próprias conclusões.

No âmbito dos conhecimentos científicos que os contos abordam, em especial, no texto de Guimarães Rosa, ainda pouco é debatido nos estudos em ensino de física. A relevância da abordagem da ótica, em partes, pode ser entendida pela formação

Alguns estudiosos afirmam ser O espelho de Guimarães Rosa uma resposta ao conto do mesmo nome escrito por Machado de Assis. Esse debate se mostra enriquecedor no contexto escolar, e possibilita uma abordagem dialógica entre modernismo e realismo brasileiro

Os contos de Machado de Assis e Guimarães Rosa, intitulados *O espelho*, já foram amplamente discutidos na pesquisa em literatura no Brasil. No entanto, pouco desses textos é apresentado na sala de aula sob o ponto de vista da física. Neste artigo, propomos um diálogo entre duas disciplinas – literatura e física – a fim de agregar novas interfaces na aprendizagem de conteúdos disciplinares.

adquirida no curso de medicina frequentado pelo autor mineiro. Portanto, se reconhece que ambos possuem forte relação com a física e, no decorrer do conto, trazem muitos aspectos da ótica. A partir de uma articulação entre conhecimento literário e científico, busca-se nesse trabalho apresentar uma tentativa de abordar esse diálogo entre os contos de Machado e Rosa em uma atividade para o Ensino Médio através da interlocução entre conhecimentos inicialmente separados nas disciplinas escolares: física e literatura.

Para começo de conversa: motivações

Existe na área de ensino de ciências um forte apreço pelos trabalhos considerados de cunho cultural. Assim, toda possibilidade de inserção de temas que eram considerados *à priori* distantes das discussões científicas passaram, ao longo dos anos, a serem compreendidos como importantes instrumentos de contextualização e aprendizagem da própria ciência [4].

João Zanetic enfatiza que qualquer possibilidade de interlocução entre duas ou mais áreas do saber encaminha os jovens estudantes para estabelecer laços com o conhecimento, permitindo que a interação desses jovens com o mundo seja pautada em um diálogo inteligente, problematizando de forma crítica os saberes escolares e os saberes para além da sala de aula, como defendia Paulo Freire [5].

David Jou, estudioso das relações das ciências da natureza com as artes, ainda lembra que, mais do que tentar explicar os resultados da ciência, as manifestações artísticas possibilitam a compreensão do papel da ciência na sociedade e explica aos sujeitos, que não fazem parte desse contexto, a importância de seu conhecimento. O autor ainda defende que a física, mais do que ser uma máquina fria de cálculos, é um encontro de seres humanos com os limites pessoais e sociais de sua época [6].

No entanto, é Klaus Mecke quem nos indica uma nova forma de perceber a literatura e a física enquanto produtos culturais. Mecke propõe um olhar para a física além do conteúdo específico e impõe, aos que a ensinam, a apresentação de sua face filosófica, histórica e cultural. O autor acredita que é possível ensinar a história da física utilizando a história da literatura [7].

Nesse contexto, o que parecia apenas a amizade, iniciada na sala dos professores, entre a professora de física e a de literatura, do Ensino Médio, tornou-se uma possibilidade de exercício científico significativo, ainda mais que a relação entre

elas e os alunos do 3º ano do mesmo segmento, também, era de afeto. Cenário perfeito para investigações e descobertas, motivadas por essa relação e pelo desejo de trabalhar conteúdos complexos de maneira interessante e provocadora. Este trabalho é resultado da atividade desenvolvida a partir dos textos de Guimarães Rosa e Machado de Assis, trazendo para o contexto de sala de aula uma possibilidade de reflexão, para os alunos e para essas professoras, sob a legitimidade da ciência, o permeio filosófico de seu pensamento e o papel do conhecimento da ótica física no trabalho desses dois grandes nomes da literatura nacional.

Diálogos reflexivos na sala de aula

A atividade aqui relatada foi realizada na Viverde – Escola de Educação Básica, na cidade de Bragança Paulista. Os estudantes que participaram das atividades propostas foram alunos do 3º ano do Ensino Médio de duas turmas de aproximadamente 25 alunos cada. A escola Viverde é uma associada Pueri Domus. Portanto, o material utilizado nas aulas regulares é dessa editora e tem como característica uma abordagem reflexiva dos conteúdos, o que possibilitou a

elaboração de uma atividade que caminhasse nessa direção. No momento em que ela foi realizada, já haviam sido trabalhados os conteúdos de ótica, previstos na grade curricular do 3º ano, assim como os ligados ao realismo e ao modernismo, no cenário da literatura brasileira. Os alunos foram convidados a participar desse exercício em período fora do horário normal de aula, como atividade extracurricular. Participaram, aproximadamente, 85% de todos os alunos convidados.

Para iniciar a discussão, apresentamos aos alunos as intenções da atividade em grupo, como segue:

Caro(a)s aluno(a)s,
Esta atividade o(a)s convida à reflexão, a partir de um olhar poético-científico-filosófico, sobre a função física e metafísica do espelho, símbolo dos questionamentos sobre o eterno limiar entre a aparência e a essência do Brasil. Esperamos que este exercício lhes revele o quanto a arte e a ciência estão próximas, unidas, e cada uma cumpre, a seu modo, a função de nos constituir como sujeitos his-



Figura 1. René Magritte, La Reproduction Interdite, 1937 [10].

tóricos.

Este exercício será avaliado considerando os conhecimentos da física demonstrados nas respostas e sua capacidade argumentativa.

Boa leitura! Boa escrita!
Excelentes descobertas!

Em seguida, foi apresentado aos alunos o texto de Contardo Calligaris intitulado *A moda: belezas extremas e indecisas* [8], o fragmento da poesia de Álvaro de Campos/Fernando Pessoa de 1928, *Tabacaria* [9] e a obra de René Magritte sob o título de *La reproduction Interdite* de 1937 [10]. O intuito de apresentar esses textos e obra foi o de suscitar discussões nos grupos a fim de conduzi-los a uma reflexão mais profunda sobre as questões que seriam apresentadas em seguida.

A atividade

Ao término das primeiras discussões, foram apresentadas aos alunos 8 questões que envolviam o conteúdo de ótica, mais especificamente os estudos associados ao espelho. Também foram feitas perguntas relacionadas ao contexto do conto e que apresentaram, do ponto de vista filosófico, conexões com o próprio pensar da ciência. Finalmente, a questão que fecha o ciclo buscou, a partir dos conhecimentos em literatura, trazer uma reflexão sobre a possível interlocução entre os textos dos dois escritores brasileiros. Nas linhas que se seguem, demonstraremos as perguntas apresentadas aos estudantes com uma pequena discussão acerca de suas finalidades. Todas as questões iniciam-se com trechos retirados dos contos indicando M.A. para o trabalho de Machado de Assis e G.R. para Guimarães Rosa.

Nesse primeiro momento os estudantes se mostraram confusos, questionando as relações entre a física e a literatura. Nesse sentido, queriam saber como a proposta se mostrava significativa no ponto de vista da ciência. Os questionamentos foram considerados positivos, pois refletem, também na prática docente das autoras, um distanciamento até aquele momento de nossas conduções na sala de aula sobre temáticas particularmente disciplinares. Os alunos, curiosos, sentiram-se instigados a prosseguir e tentar compreender a proposta que as docentes traziam naquele contexto.

Um aspecto significativo ao tentar introduzir, sob o ponto de vista do conhecimento científico, as questões iniciais, tiveram por princípio debater questões consideradas mais simplificadas e diretas. Esse primeiro contato entre os alunos e as questões surtiram o efeito esperado de

promover de maneira pontual a relação entre a física e a literatura proposta na atividade. Pode-se perceber que os estudantes iniciaram os debates lembrando dos conceitos de ótica e aos poucos foram trazendo articulações com o contexto literário envolvido.

Assim, a apresentação das questões organizou-se em dois blocos: o primeiro direcionado à interpretação de texto, com prioridade na dimensão física do conteúdo; no segundo momento, foi solicitada aos estudantes uma reflexão mais profunda sobre a relação entre física e literatura, por meio de uma análise entre os dois contos.

A primeira pergunta teve como objetivo iniciar uma discussão sobre os conteúdos de ótica, redirecionando o grupo para o enfoque a ser dado durante as questões que se seguiam. Como resposta, esperava-se que o aluno discutisse a difusão e a ordenação no feixe de luz, assim como o papel da superfície (rugosa ou lisa) para a reflexão da luz:

O senhor, por exemplo, que sabe e estuda, suponho nem tenha ideia do que seja na verdade – um espelho? (G.R.)
Um espelho reflete totalmente (ou quase) a luz que nele incide, bem como uma parede branca. Em que diferem um espelho e uma parede branca então? Ou seja, o que é na verdade um espelho? De que ele é feito? Quais são as condições necessárias para que sua superfície seja refletora?

A segunda questão discute o *olhar* a alma sob dois pontos de vista (fora e dentro). Na pergunta que segue, propusemos que os alunos discutissem o que significa, do ponto de vista de uma definição conceitual, as imagens real e virtual. É importante salientar que o tema havia sido apresentado aos alunos em um momento que antecedeu as atividades. Apesar de não haver, para as docentes, uma resposta considerada correta, esperava-se que os alunos tivessem a capacidade de articular o contexto do conto com o papel das definições na ciência.

Nada menos de duas almas. Cada criatura humana traz duas almas consigo: uma que olha de dentro para fora, outra que olha de fora para dentro...

O autor cita duas maneiras diferentes de observar a alma. Discuta, a partir dos conceitos da física, quais devem ser a

imagem real e a virtual para essas duas definições: “(...) uma que olha de dentro para fora, outra que olha de fora para dentro... (M.A.)

A terceira questão traz, a partir das discussões de Rosa, uma possível forma de avaliar o que seria um espelho honesto, ou seja, um espelho que não modifica a imagem (espelho plano). Em seguida, propusemos aos alunos uma reflexão sobre o que distingue a imagem do objeto.

O espelho, são muitos, captando-lhe as feições; todos refletem-lhe o rosto, e o senhor crê-se com aspecto próprio e praticamente imudado, do qual lhe dão imagem fiel. Mas – que espelho? Há-os “bons” e “maus”, os que favorecem e os que detraem; e os que são apenas honestos, pois não. E onde situar o nível e ponto dessa honestidade ou fidedignidade? Como é que o senhor, eu, os restantes próximos, somos, no visível? (G.R.)
Dentre os espelhos estudados, quais são “honestos”, ou seja, quais refletem imagens fiéis dos objetos?

O trecho do conto de Machado de Assis indica uma multiplicação de almas segundo o reflexo do espelho. A proposta feita aos estudantes era discutir sobre as maneiras, segundo a física, de se multiplicar as imagens. Nesse sentido, também foi esperado que os estudantes trouxessem discussões acerca das diferenças associadas aos distintos “reflexos” da literatura e os reflexos da física.

Pela minha parte, conheço uma senhora, – na verdade, gentilíssima, – que muda de alma exterior cinco, seis vezes por ano. Durante a estação lírica é a ópera; cessando a estação, a alma exterior substitui-se por outra: um concerto, um baile do Cassino, a Rua Ouvidor, Petrópolis... (M.A.)

Considerando que a alma, segundo o narrador, pode ser o reflexo do espelho, que maneira física você utilizaria para multiplicar a “alma humana”? Com este artifício você poderia adquirir infinitas almas?

Na questão que se segue, procuramos instigar os alunos a pensar em outras for-

mas possíveis de reflexão que não somente o espelho plano, do contexto do conto.

“A realidade das leis físicas não permite negar que o espelho reproduziu-me textualmente, com os mesmos contornos e feições;...” (M.A.)

Discuta, a partir das reflexões das aulas de física, quais tipos de espelhos produzem imagens com “os mesmos contornos e feições”.

A questão seguinte pediu ao estudante que discutisse sobre ausência de luz e sua reflexão. Buscou-se, nesse momento, articular a relação entre conhecimento cultural e o saber científico. Tinha-se a pretensão de que os estudantes pudessem trazer algumas considerações da ciência para percepções ditas populares.

O espelho inspirava receio supersticioso aos primitivos, aqueles povos com a ideia de que o reflexo de uma pessoa fosse a alma. Via de regra, sabe-o o senhor, é a superstição fecundo ponto de partida para a pesquisa. A alma do espelho - anote-a - esplêndida metáfora. Outros, aliás, identificavam a alma com a sombra do corpo; e não lhe terá escapado a polarização: luz-treva. (G.R.)

No campo das ideias supersticiosas populares, para uns, o reflexo de uma pessoa é sua alma, mas, para outros, a sombra é que é a alma. E no campo científico, o que são o reflexo e a sombra?

Na questão seguinte foi sugerida uma discussão sobre a decodificação e a reprodução das imagens no processo neurológico dos seres humanos. O tema apresentado foi trabalhado em sala de aula em momento anterior à atividade.

Por começo a criancinha vê os objetos invertidos, daí seu desajeitado tatear; só a pouco e pouco é que consegue retificar, sobre a postura dos volumes externos, uma precária visão. (G.R.)

Por que a criancinha vê os objetos invertidos? E nós, não os vemos invertidos por quê?

Finalmente, a última questão teve a intenção de possibilitar aos grupos algo que lhes era peculiar, a defesa de um ponto de vista, uma vez que não havia resposta sim ou não, mas um espaço para discutir e argumentar. Esta questão foi a única que não abordou conceitos específicos de ótica e, como os alunos sempre diziam durante as aulas de português, eles puderam “viajar” na construção da resposta, respeitando os limites indicados pelos textos.

“(…)Quando nada acontece, há um milagre que não estamos vendo. (...) Os olhos, por enquanto, são a porta do engano; duvide deles, dos seus, não de mim.” (G.R.)

“(…) Os fatos explicarão melhor os sentimentos: os fatos são tudo.” (M.A.)

Considerando os fragmentos acima, é possível afirmar que existe uma incoerência entre os textos de Machado e de Rosa. A partir da leitura realizada pelo grupo, apresente uma relação possível entre essas ideias, mostrando pontos de contato e/ou discordância.

Se, no começo, os alunos se mostraram receosos em relação aos conteúdos de física e à proposta de um olhar a partir dos textos literários, percebeu-se que, ao longo das atividades, questões mais complexas foram sendo produzidas, tornando-se necessária a intervenção tanto da docente de literatura como da de física. Quando os alunos começaram a fazer as conexões e perceber que poderia haver dimensões ainda inexploradas até pelas docentes, sentiram-se instigados a discutir e aprofundar as questões, como o sentido do espelho para os autores ou os motivos do uso dos conhecimentos da ótica por Guimarães Rosa em seu texto.

Descobertas

Os dois campos do saber – ciência e literatura – são importantes instrumentos de aprendizagem quando apresentados como complementares para os estudantes da escola básica. Assim, a maneira de lidar com o texto literário pode ser modificada quando o sujeito que o lê, de certa forma, reconhece presentes nele elementos do conteúdo físico. Ao entender esse conhecimento em um contexto maior, o aluno pode perceber que a ciência é uma

forma de expressão e construção da realidade. Esse tipo de relação implica em olhar a literatura e a ciência como instrumentos da criação humana, diferentes em seus aspectos de criação e linguagem, mas próximos por suas procuras mais primordiais como questionamentos sobre nossa existência.

A atividade apresentada neste trabalho foi avaliada sob dois olhares – da física e da literatura – procurando, na interface com essas duas formas do saber, criar vínculos afetivos com o próprio conhecimento. Tal afetividade não se caracteriza pela relação ingênua do “gostar da ciência ou da literatura”, mas fazer-se entender uma ciência não tão distante do escritor, e ao mesmo tempo, uma literatura que se próxima em muitos aspectos da física.

Assim, a intervenção com os alunos se mostrou positiva, pois os próprios estudantes demonstraram surpresa pela relação estabelecida entre esses dois campos do conhecimento. Tal reflexão possibilitou que outras instâncias da física pudessem ser abordadas no contexto escolar e, conseqüentemente, que fossem criadas novas possibilidades de aprendizagem e de leitura do texto artístico.

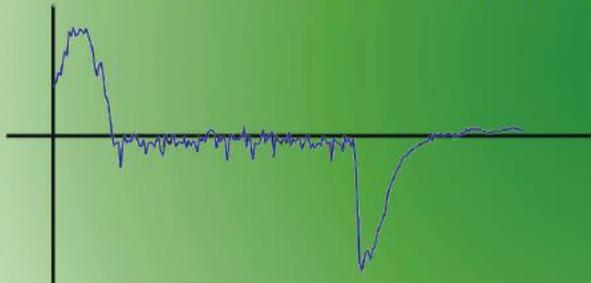
Agradecimentos

Gostaríamos de agradecer às Profas. Rosane Acedo Vieira, Maria Regina Zago Leite da Silva e Viviane Moraes Alves, pelas indicações e sugestões durante o percurso do trabalho.

Referências

- [1] Edna Maria E.S. Nascimento e Maria Célia Leonel, *Revista Anpoll* 2, 24 (2008).
- [2] Machado de Assis, in: *Machado de Assis: Contos* (Agir, Rio de Janeiro, 1973).
- [3] João Guimarães Rosa, *Primeiras Estórias* (José Olympio, Rio de Janeiro, 1972).
- [4] Ana M. Menezes e Andréia G. de Moraes, in: *Anais do XVIII Simpósio Nacional de Ensino de Física*, Vitória (2009).
- [5] João Zanetic, *Ciência e Cultura* 57, 3 (2005).
- [6] Daniel Jou, in: *Física de Cada Dia* (Sabadell, Madrid, 2007).
- [7] Klaus R. Mecke, *Gazeta de Física* 27, 4 (2005).
- [8] Contardo Calligaris, *Terra de Ninguém* (Publifolha, São Paulo, 2004).
- [9] Fernando Pessoa, *Obra Poética* (Ed. Aguilar, Rio de Janeiro, 1981).
- [10] René Magritte, *La Reproduction Interdite*, in: *Museu Boymans-van-Beuniguem*, Rotterdam, 1937.

Mecânica com o acelerômetro de *smartphones* e *tablets*



.....
Leonardo P. Vieira

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

.....
Carlos Eduardo Aguiar

Instituto de Física, Universidade
Federal do Rio de Janeiro, Rio de
Janeiro, RJ, Brasil
E-mail: carlos@if.ufrj.br
.....

Introdução

Os *smartphones* e *tablets* são computadores extremamente portáteis com aplicações que vão muito além da comunicação telefônica ou acesso à internet. Por exemplo, esses dispositivos podem ser muito úteis ao ensino de física, por trazerem de fábrica uma variedade de sensores que medem grandezas físicas de interesse: acelerômetro (mede aceleração), giroscópio (mede velocidade angular), magnetômetro (campo magnético), luxímetro (intensidade luminosa), barômetro (pressão atmosférica), higrômetro (umidade do ar), GPS (posição) e sensor de proximidade, além dos facilmente reconhecíveis microfone e câmera fotográfica e de vídeo.

Todos esses sensores têm programas que leem as medidas efetuadas, mostram o resultado na forma de gráficos e armazenam os dados coletados em arquivos. Se necessário, os arquivos de dados podem ser enviados por *e-mail* (ou forma equivalente) a um computador maior para posterior análise. Muitos desses programas são gratuitos e podem ser obtidos facilmente via internet.

A diversidade de sensores encontrados nos *smartphones* e *tablets* torna possível realizar um grande número de experimentos e observações sem a utilização de aparelhos de medida dispendiosos e difíceis de encontrar em uma escola. Mais ainda, a portabilidade dos aparelhos facilita a montagem de experimentos em salas de aula regulares, dispensando em muitos casos o deslocamento dos alunos a um laboratório (que pode nem existir na escola). A realização de experimentos em sala de aula permite associar atividades

práticas à apresentação expositiva de conceitos físicos, auxiliando o aluno a compreender melhor aquilo que ele está estudando naquele momento. Para os docentes que acreditam que a experiência prática de observar e intervir no mundo é essencial à construção do conhecimento – “é agindo sobre o mundo que nossas ideias sobre ele se desenvolvem” [1] – o uso de *smartphones* e *tablets* em experimentos em sala de aula pode vir a ser muito útil. Em um dos poucos estudos

sobre como estudantes respondem à introdução desses aparelhos em atividades escolares, Van Dusen e Otero observaram que “ao facilitar a coleta de dados, análise e colaboração, os *tablets* permitiram que os estu-

A diversidade de sensores encontrados nos *smartphones* e *tablets* torna possível realizar um grande número de experimentos e observações sem a utilização de aparelhos de medida dispendiosos e difíceis de encontrar em uma escola

dantes tirassem suas próprias conclusões baseados em evidências, ao invés de depender do livro ou professor para chegar a soluções” e que “ao contrário de anos anteriores, os alunos começaram a ir regularmente à sala de aula fora do horário de classe para trabalhar em projetos de física” [2].

A facilidade de uso dos *smartphones* e *tablets* em atividades práticas na sala de aula é reforçada pela possibilidade de apresentação gráfica em tempo real dos resultados das medidas, uma característica da maioria dos programas de leitura dos sensores. Isso torna mais simples avaliar rapidamente o que está sendo obtido num experimento, mostrando, por exemplo, que novas tomadas de dados devem ser realizadas ou que ajustes são necessários para melhorar a qualidade dos resultados. Ainda mais importante, ao ganhar acesso imediato a gráficos e análises estatísticas os estudantes podem avaliar melhor o significado e implicações dos resultados experimentais, comparan-

Descrevemos experimentos de mecânica baseados no acelerômetro encontrado em *tablets* e *smartphones*. Os experimentos são apropriados a cursos introdutórios de física, em particular (mas não exclusivamente) do Ensino Médio.

do-os com suas expectativas ou previsões. Dúvidas e questões levantadas durante esse processo podem, inclusive, levar à realização de novos experimentos que estendam a investigação original.

Os *tablets* e *smartphones* são atraentes como instrumentos de laboratório por motivos que vão além de sua utilidade como ferramenta de medida. Esses aparelhos são bastante difundidos entre os jovens na idade escolar, sendo muito utilizados em sala de aula, geralmente de forma imprópria e clandestina (troca de mensagens, redes sociais, etc.), gerando frequentes problemas disciplinares e levando algumas escolas a proibir seu uso. Eles fazem parte da vida e cultura dos estudantes, que estão acostumados a utilizá-los e encaram com interesse novas possibilidades de aplicação. O uso de um aparelho que faz parte do cotidiano fornece aos alunos uma referência familiar, capaz de mediar sua participação em experimentos didáticos. Essa mediação facilita não apenas a realização das atividades propostas pelo professor; ela também favorece o desenvolvimento de novas ações investigativas por parte dos alunos, como a proposta de experimentos que estendam a atividade prática original. Nada impede que essas ações sejam, inclusive, realizadas fora da sala de aula ou da escola. Como boa parte dos estudantes carrega um *smartphone* em seu bolso, eles podem utilizar os recursos do aparelho para analisar fenômenos do seu dia-a-dia, estabelecendo a relação essencial entre a física estudada na sala de aula e a experiência cotidiana.

Neste artigo apresentaremos experimentos de mecânica baseados no acelerômetro encontrado nos *tablets* e *smartphones* e relataremos atividades práticas realizadas em sala de aula, descrevendo em alguns casos a reação dos alunos. Uma discussão mais extensa, incluindo exemplos da utilização de outros sensores, pode ser encontrada na Ref. [3].

Mecânica com o acelerômetro

A maioria dos *tablets* e *smartphones* tem um acelerômetro, utilizado para organizar as telas desses dispositivos, mantendo textos e figuras orientados ao longo da direção de leitura mais confortável ao usuário.

O típico acelerômetro de um *tablet* ou *smartphone* é capaz de medir acelerações no intervalo ± 2 g (g é a aceleração da gravidade), em relação a um referencial inercial. A resolução pode chegar a 0,002 g, mas na prática é frequentemente limitada pelo ruído gerado por vibrações mecânicas do aparelho. O acelerômetro é um sistema eletromecânico baseado em

minúsculos capacitores cujas placas têm uma certa elasticidade, o que faz com que a distância entre elas varie quando o dispositivo sofre uma aceleração. Isso altera as capacitâncias, que uma vez medidas permitem a inferência da aceleração. Diferentes conjuntos de capacitores são dispostos de maneira a determinar a aceleração em três eixos distintos (X , Y e Z). Na maioria dos dispositivos os eixos estão dispostos como na Fig. 1.

Há muitos programas que registram as medidas do acelerômetro (as três componentes da aceleração) como função do tempo, apresentando o resultado em tempo real na forma de gráficos e armazenando os valores numéricos em tabelas que podem ser enviadas para outros computadores. Exemplos de programas gratuitos para os sistemas Android e iOS estão nas Refs. [4, 5].

Na verdade, o acelerômetro não mede propriamente a aceleração \mathbf{a} , mas a grandeza

$$\mathbf{a}' = \mathbf{g} - \mathbf{a},$$

onde \mathbf{g} é o vetor aceleração da gravidade. Por exemplo, o acelerômetro de um *smartphone* colocado sobre uma mesa com a tela para cima indicará $a'_x = a'_y = 0$ e $a'_z = -9,8$ m/s². Em queda livre (sem rotação) ele registrará $a'_x = a'_y = a'_z = 0$. Em alguns programas é possível “zerar” o acelerômetro, subtraindo das medidas o valor de \mathbf{a}' registrado no momento da calibração, a qual, supostamente, ocorre num instante em que $\mathbf{a} = 0$. Isso fará com que um aparelho em repouso (num referencial inercial) indique aceleração nula. É importante notar que essa calibração é feita componente a componente e, por-

Os tablets e smartphones são atraentes como instrumentos de laboratório por motivos que vão além de sua utilidade como ferramenta de medida, pois eles fazem parte da vida e cultura dos estudantes, que estão acostumados a utilizá-los e encaram com interesse novas possibilidades de aplicação



Figura 1. Orientação dos eixos que definem as componentes da aceleração de um *tablet* ou *smartphone* típico.

tanto, só será útil se o aparelho não sofrer rotações.

Queda livre

O experimento mais simples que pode ser feito com o acelerômetro é, provavelmente, a “queda livre”. Para realizá-lo em sala de aula basta subir em uma cadeira, iniciar a gravação dos dados do acelerômetro e deixar o *tablet/smartphone* cair, não sem antes pedir que um par de alunos estique um pano para aparar o dispositivo sem danificá-lo. A Fig. 2 mostra a aceleração medida em um desses experimentos. Note que o resultado é apresentado em unidades de g . Pode-se ver que a aceleração do *tablet/smartphone* manteve-se constante e igual a g durante a queda. A “calibração” disponível no programa foi usada; sem ela, como já mencionamos, encontraríamos aceleração zero durante a queda livre.

O experimento põe a teste, de maneira particularmente simples, uma das ideias

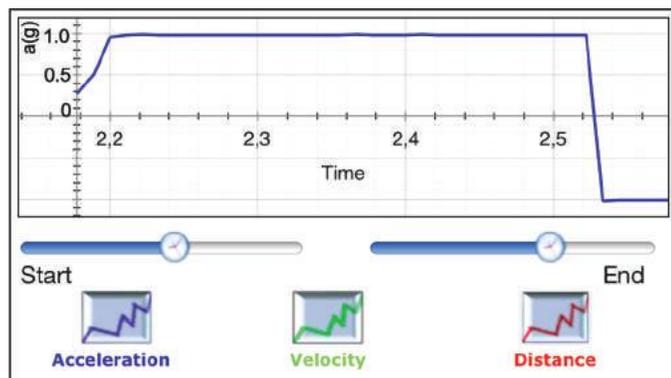


Figura 2. Aceleração em função do tempo no experimento de queda livre.

mais discutidas no Ensino Médio, a de que corpos em queda livre têm aceleração constante. Apesar da importância desse tema e do tempo dedicado a ele nos cursos introdutórios de física, poucos experimentos sobre a queda livre costumam ser realizados em sala de aula.

O experimento foi realizado pelos alunos de uma turma do segundo ano do Ensino Médio, que no momento estudavam cinemática. O gráfico mostrado na Fig. 2 foi obtido por um dos grupos que fizeram o experimento. Após fazer as medidas os alunos responderam a questões como:

(i) Quanto tempo o *tablet/smartphone* ficou no ar?

(ii) A aceleração do dispositivo permaneceu constante durante toda a queda?

(iii) Se deixarmos cair um *tablet* e um *smartphone*, qual registrará maior valor para a aceleração?

A última pergunta é uma releitura da questão clássica conhecida por todos os professores de física, e o resultado encontrado após o experimento não foi muito diferente do esperado. Dos 38 alunos da turma, 29 responderam que o *tablet* teria que registrar maior aceleração. A justificativa dada pelos alunos para essa resposta foi que o *tablet* é mais pesado que o *smartphone*. Com um experimento realizado logo em seguida foi possível observar em sala de aula que dois corpos de massas bem distintas – o *tablet* com 600 g e o *smartphone* com 100 g – caem com igual aceleração. Resultados experimentais como esse são importantes como estratégia de convencimento dos alunos, que muitas vezes interpretam impressões puramente visuais de acordo com suas concepções prévias, afirmando notar que o corpo mais pesado alcança o solo antes do mais leve mesmo quando isso não ocorre. Entretanto, como veremos mais à frente, nem mesmo uma confirmação experimental consegue convencer a maior parte dos alunos, mostrando que a desconstrução de um conceito arraigado leva tempo e exige múltiplas intervenções de naturezas distintas.

○ paraquedas

Um desenvolvimento natural do experimento de queda livre é o estudo dos efeitos de resistência do ar e o conceito de velocidade limite.

Para tanto, pedimos que os alunos descrevessem em um texto como seria a aceleração sentida por um paraquedista desde o salto do avião até a estabilização da velocidade com o paraquedas aberto. Dos 38 alunos da turma, 34 fizeram o trabalho e todos, sem exceção, disseram

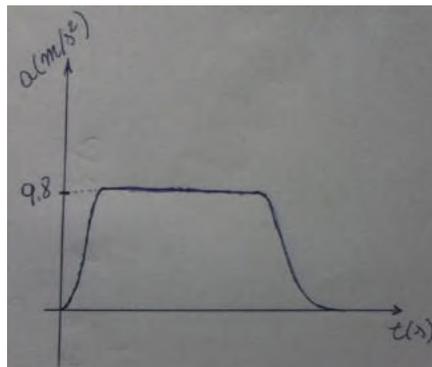


Figura 3. Esboço de um aluno do segundo ano do Ensino Médio, sobre como deveria ser a aceleração de um paraquedista desde o salto até depois da abertura do paraquedas.

que o paraquedista sentiria $9,8 \text{ m/s}^2$ até abrir o paraquedas. Desses 34, 19 disseram que após essa ação a aceleração diminuiria até se estabilizar. Alguns alunos esboçaram gráficos de como seria a aceleração em função do tempo; um exemplo está mostrado na Fig. 3.

Para por a teste a perspectiva apresentada pelos alunos, prendemos um pequeno paraquedas ao *smartphone* (Fig. 4), fomos até a uma janela do 2º andar da escola e deixamos o *smartphone* cair. O paraquedas estava inicialmente fechado e se abriu inflado pela passagem do ar. A aceleração medida pelo acelerômetro está mostrada na Fig. 5.

As regiões *a*, *b* e *c* no gráfico da Fig. 5 representam, respectivamente, o aparato antes de ser solto (seguro pelo professor à janela), o período em que o paraquedas está se abrindo e, finalmente, o paraquedas totalmente aberto.

Note que nessa última região temos uma aceleração negativa, o que indica que a força resultante está para cima, freando o conjunto. Isso mostra que quando o paraquedas se abre o *smartphone* está a uma velocidade maior que a limite, e portanto a resistência do ar será maior que a força peso, diminuindo a velocidade do conjunto até que ambas as forças se



Figura 4. O *smartphone* acoplado a um paraquedas caseiro.

igualem gerando uma situação de equilíbrio. A grande aceleração para cima (negativa) que surge quando o paraquedas se abre completamente é bem conhecida dos paraquedistas, que a chamam de *tranco*. O *plateau* em $-1g$ visto na região *c* do gráfico da Fig. 5 reflete a limitação do acelerômetro ao intervalo $\pm 2g$. Ao “zerarmos” o sensor somamos g à aceleração medida, o que produz um intervalo de leitura de $-g$ a $3g$.

É importante ressaltar como o resultado do experimento confronta a ideia original da maioria dos alunos de que numa queda a aceleração aponta sempre para baixo (ver a Fig. 3, por exemplo). Outro aspecto importante do experimento é que ele foge ao escopo tradicional do Ensino Médio, onde apenas situações envolvendo aceleração constante costumam ser tratadas. Os alunos, de maneira geral, relataram que gostaram muito dessa atividade; frases como “eu nem imaginava que poderia fazer tanta coisa com meu celular...” foram ouvidas.

○ iCar

Muitos experimentos interessantes podem ser realizados colocando-se o *tablet/smartphone* sobre um carrinho. Construímos esse carrinho prendendo quatro rodas de *skate* sob uma plataforma

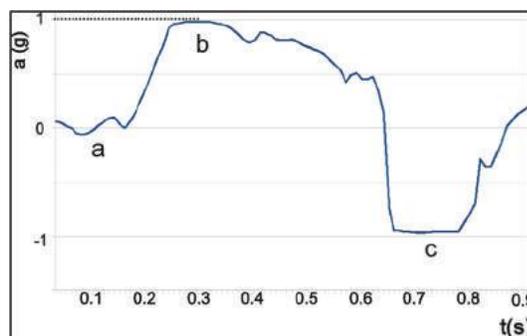


Figura 5. A aceleração em função do tempo do *smartphone* em queda com paraquedas.

desenhada para receber e proteger um *tablet*. O resultado da montagem foi chamado de *iCar* pelos alunos e está mostrado na Fig. 6.

Como primeira aplicação do *iCar* estudamos um simples empurrão sobre o carrinho, em uma turma do segundo ano do Ensino Médio. O *tablet* estava conectado por *wifi* a um computador de mesa, que por sua vez estava ligado a um *datashow*. Com isso a tela do *tablet* era projetada no quadro, de modo que os alunos podiam ver e analisar o gráfico da aceleração do *iCar*. O resultado de uma dessas medidas está na Fig. 7, que mostra a aceleração durante o empurrão que pôs o carrinho em movimento (região *a* do gráfico) e o deslocamento posterior (região *b*). Após um tempo o *iCar* foi freado (pelo pé de um aluno); essa desaceleração corresponde à região *c*.

Foi discutido com os alunos o porquê

da aceleração do *iCar* durante o empurrão ter sinal oposto à aceleração na frenagem. A relação entre a variação da velocidade e a área sob o gráfico da aceleração também foi discutida, e o fato das áreas das regiões *a* e *c* serem aproximadamente iguais (a menos do sinal) foi associado ao carrinho estar em repouso no início e final do movimento.

Para fazer uma experiência como essa não é necessário montar um carrinho “sofisticado” como o *iCar*. A mesma ideia pode ser implementada com o *skate* de um aluno, por exemplo, ao qual o *tablet* é preso com uma fita adesiva.

$$F = m a$$

Qualitativamente, a segunda lei de Newton diz que forças causam acelerações (e não velocidades, como pensava Aristóteles). Isso foi observado no experimento da seção anterior, em que o *iCar* era acele-

rado por “empurrões”. Mas como mostrar que a relação quantitativa entre força e aceleração é linear? Fizemos isso com auxílio de um dinamômetro de mola, com o qual estudamos a aceleração impelida ao *iCar* por uma força dada. O experimento é muito simples e está esquematizado na Fig. 8: fixamos uma das extremidades do dinamômetro na mesa do professor e a outra no *iCar*, distendemos o dinamômetro até atingir determinado valor da força e em seguida soltamos o carro, registrando a aceleração com o acelerômetro.

Repetindo esse procedimento para vários valores distintos da força, obtivemos gráficos da aceleração em função do tempo como os mostrados na Fig. 9. Como era de se esperar, em cada caso temos uma aceleração que varia com o tempo, pois a força exercida pelo dinamômetro diminui à medida que sua mola volta à posição de equilíbrio. A aceleração inicial do carrinho, relacionada à força registrada pelo dinamômetro, é dada aproximadamente pelo valor máximo da aceleração em cada curva. O resultado dessas medidas – força vs. aceleração máxima – está mostrado na Fig. 10. Os pontos são os resultados das medidas e a linha representa o ajuste de uma reta a esses dados. A qualidade do ajuste mostra que a força é linearmente proporcional à aceleração. Mais ainda, o coeficiente angular da reta ajustada é 1,63 kg, muito semelhante à massa do conjunto *iCar*+*smartphone*, que era de 1,54 kg (uma diferença de 5,8%).

Após realizar o experimento e encontrar a relação entre a força e a aceleração, foi perguntado aos alunos o que ocorreria se mudássemos a massa do conjunto, acelerando-o sempre com a mesma força inicial? A maioria dos alunos afirmou que a aceleração deveria diminuir com o aumento da massa. Alguns estudantes fizeram esboços de gráficos para auxiliá-los na resposta. Um desses gráficos pode ser visto na Fig. 11, tendo o autor sugerido que o experimento ficaria mais completo se também alterássemos a massa, uma proposta interessante já que vários dos gráficos apresentados pelos alunos descreviam uma diminuição linear da aceleração com a massa.

O *iCar* no plano inclinado

O plano inclinado é um dos temas prediletos no ensino de mecânica. Geralmente ele é abordado de maneira puramente teórica (e chata, segundo muitos alunos), sem apoio de experimentos quantitativos. Com o *iCar* – ou qualquer carrinho capaz de carregar um *tablet* ou



Figura 6. O *iCar*, carrinho de brinquedo que transporta um *tablet*.

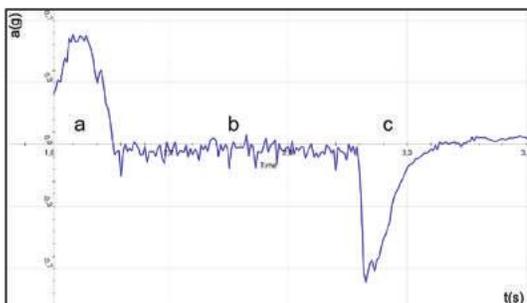


Figura 7. Aceleração durante o empurrão (*a*), deslocamento (*b*) e frenagem (*c*) do *iCar*.

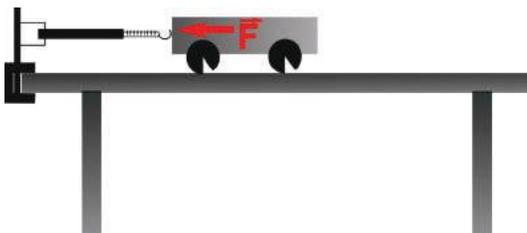


Figura 8. O *iCar* preso a um dinamômetro.

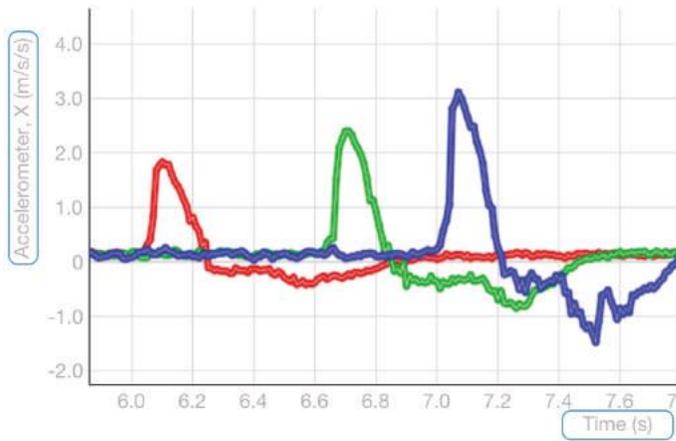


Figura 9. Acelerações impelidas ao *iCar* por diferentes forças.

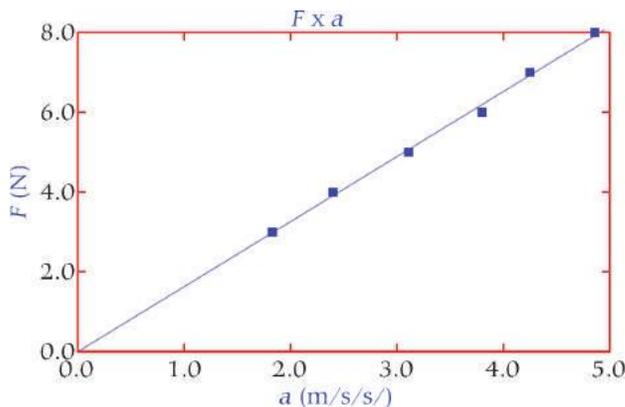


Figura 10. Força registrada no dinamômetro em função da aceleração máxima do carrinho. Os pontos são as medidas efetuadas e a linha é um ajuste linear aos dados.

smartphone - é possível realizar experimentos sobre o movimento em planos inclinados, colocando os resultados teóricos a teste.

Os experimentos foram realizados em sala de aula e o plano inclinado foi construído apoiando a mesa do professor sobre uma cadeira, como esquematizado na Fig. 12.

O ângulo de inclinação ϕ foi determinado com o próprio acelerômetro, uma vez que vários programas de leitura desse sensor são capazes de indicar a inclinação

do aparelho em relação à direção vertical, funcionando como medidores de “nível”.

Após inclinar a mesa, o *iCar* foi colocado sobre ela e seguro por um obstáculo. A tela do *tablet* foi projetada por um *datashow*, via *wifi* e um segundo computador. A inclinação foi medida com o programa de “nível”, resultando em $\phi = 14,5^\circ$.

Foi então pedido aos alunos que calculassem a aceleração com que o carrinho desceria esse plano inclinado, fazendo um diagrama de forças e aplicando a segunda lei de Newton. Muitos alu-

nos disseram que não seriam capazes de realizar a tarefa por não saberem o valor da força de atrito. Pedimos a eles que desconsiderassem o atrito, dizendo que mais à frente seríamos capazes de verificar se essa hipótese fora razoável. Na lousa da sala de aula estavam escritos o ângulo medido, a massa do conjunto *iCar* + *tablet*, a aceleração da gravidade e o comprimento do tempo da mesa. Boa parte dos alunos chegou ao resultado esperado, ou seja, que desprezando o atrito a aceleração do carrinho seria

$$a = g \sin(14.5^\circ) = 2,4 \text{ m/s}^2.$$

O passo seguinte foi realizar o experimento. Retiramos o obstáculo que segurava o carro e medimos a aceleração do movimento. O resultado encontrado está na Fig. 13. Do gráfico vemos que aceleração do *iCar* foi de aproximadamente $2,3 \text{ m/s}^2$. O valor calculado ($2,4 \text{ m/s}^2$) está muito próximo do medido; a pequena discrepância provavelmente deve-se a efeitos desprezados no cálculo (atrito, momento de inércia das rodas, etc.)

É interessante notar que a grande maioria dos alunos utilizou o valor da massa do carrinho em seus cálculos da aceleração, sem perceber que isso era desnecessário. Até os que erraram o cálculo (em geral por não dominarem decomposição de vetores) incluíram o valor da massa em suas considerações. Então, após o término do experimento, fizemos a seguinte pergunta: “Se aumentarmos a massa carregada pelo *iCar* e o deixarmos descer o plano inclinado, o que ocorrerá com a aceleração?”. As alternativas eram:

- (i) A aceleração diminui.
- (ii) A aceleração mantém-se a mesma.
- (iii) A aceleração aumenta.

Dos 32 alunos participantes, apenas 9 escolheram a alternativa correta (ii). A alternativa (iii), que reflete a noção usual de que “o mais pesado desce mais rápido”, foi a escolhida por 18 alunos, mais da metade do total. A opção (i) foi escolhida por 7 alunos. Assim, constatamos que

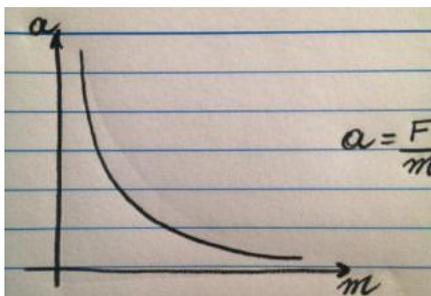


Figura 11. Gráfico de aceleração por massa, esboçado por um aluno do segundo ano do Ensino Médio.

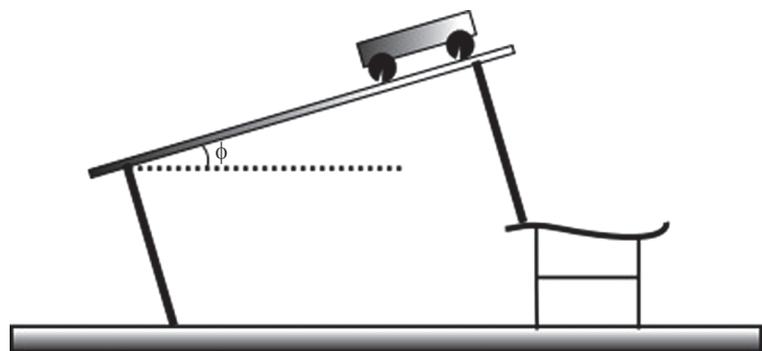


Figura 12. O plano inclinado com o *iCar*.

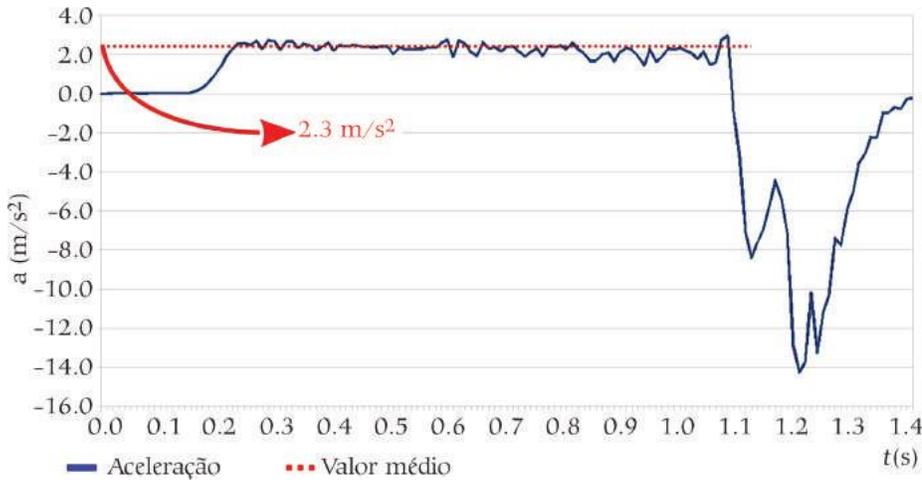


Figura 13. Aceleração do *iCar* deslizando sobre a mesa inclinada.

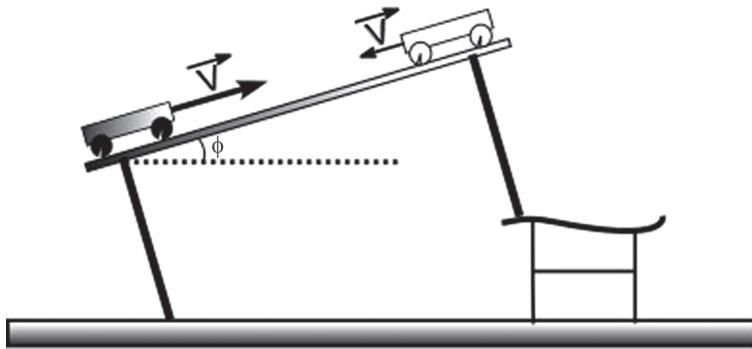


Figura 14. Subida e descida do *iCar* em uma mesa inclinada.

apesar de terem discutido a queda livre corpos de massas diferentes em um experimento anterior, os alunos não foram capazes de fazer a conexão entre um experimento e outro. Dos 9 alunos que responderam corretamente, 4 o fizeram por que decidiram fazer as contas com a massa diferente e perceberam que ela não era necessária; os demais não deram uma justificativa plausível para suas escolhas.

Ainda em sala de aula, realizamos uma variação simples e instrutiva do experimento: empurramos o *iCar* ladeira acima e o aparamos de volta (ver a Fig. 14).

Essa versão do experimento permite a releitura de uma questão clássica, que revela quão grandes são as dificuldades enfrentadas pelos alunos na aprendizagem de mecânica. A questão é: quando jogamos uma bolinha para cima, o que acontece com a sua aceleração no ponto mais alto da trajetória? É bem sabido pelos professores de cursos introdutórios de física (e confirmado pela literatura, ver Refs. [6,7], por exemplo) que grande parte dos alunos diz que a aceleração do corpo é zero no alto da trajetória. Concepções intuitivas e um entendimento precário de

conceitos de cinemática e da segunda lei de Newton levam esses alunos a não admitir que um corpo com velocidade zero possa ter aceleração não nula.

Após realizar o experimento como

esquematizado na Fig. 14 pedimos que os alunos se dividissem em grupos e discutissem o movimento a partir do gráfico da aceleração gerado na tela do *tablet*, visível a todos via o *datashow* (Fig. 15). Note que o gráfico também mostrava a velocidade e a posição do carrinho, calculadas pelo programa de leitura do acelerômetro [5]. Apenas uma pergunta foi feita: o que acontece com a aceleração do *iCar* quando ele está no ponto máximo de sua trajetória? Sem exceção, todos os grupos responderam que a aceleração caía a zero! Isso tendo à sua frente um gráfico que dizia outra coisa! Em seguida os alunos foram solicitados a apontar no gráfico (que continuava projetado à vista de todos) o instante de tempo em que o valor a aceleração assumia o valor zero. Os alunos responderam que não havia esse instante. Perguntados sobre por que, então, haviam afirmado que a aceleração era zero quando o carrinho chegava no ponto mais alto, os alunos disseram, em grande maioria, que “isso era óbvio e que não precisavam do gráfico para responder à questão”.

Conclusões

A experimentação tem papel fundamental no processo de ensino e aprendizagem da física. Sua importância vai muito além daquela sugerida por um certo empirismo ingênuo, mas muito difundido, segundo o qual a fonte de todo conhecimento científico seria a observação da natureza [8]. Na aprendizagem da física o experimento atua como mediador essencial entre o mundo real e as ideias e conceitos que os alunos tentam construir (ou substituir) em seus estudos.

Nos exemplos mostrados neste traba-

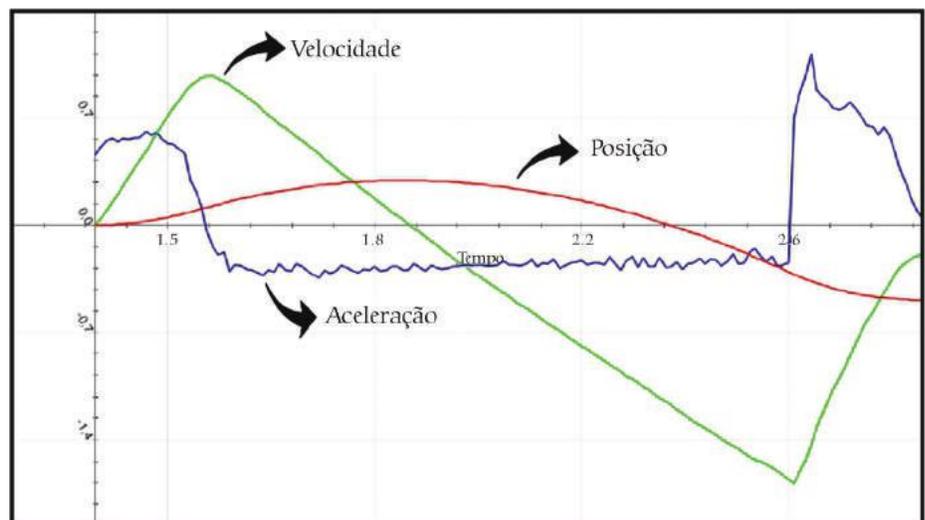


Figura 15. Aceleração, velocidade e posição do *iCar* durante a subida e descida em uma mesa inclinada. A velocidade e posição são calculadas a partir da aceleração pelo programa de leitura do acelerômetro [5].

lho, vimos que *tablets* e *smartphones* podem viabilizar o desenvolvimento de experimentos didáticos em que a coleta e apresentação dos dados é realizada com extrema rapidez e simplicidade, abrindo espaço para a discussão e interpretação imediatas dos resultados encontrados e facilitando a integração de atividade práticas a aulas que de outro modo seriam puramente expositivas.

Todos os experimentos que apresentamos foram baseados no acelerômetro.

É interessante notar que, embora seja uma grandeza fundamental para o estudo da mecânica, a aceleração raramente é medida diretamente em laboratórios didáticos convencionais, pois acelerômetros costumam ser sensores caros e difíceis de operar. Como vimos, essa situação mudou radicalmente com o surgimento dos *tablets* e *smartphones*, e é razoável prever que algo semelhante deverá ocorrer com outros sensores desses aparelhos.

Finalmente, deve ser ressaltado que as atividades que descrevemos tiveram resultados muito promissores no que diz respeito ao engajamento dos estudantes às práticas realizadas e às discussões que as acompanharam. Se bem explorada, a possibilidade do aluno utilizar seu próprio aparelho celular na investigação de fenômenos físicos abre muitas possibilidades de atuação, inclusive fora da escola, aproximando situações cotidianas aos temas abordados em sala de aula.

Referências

- [1] R. Millar, *The Role of Practical Work in the Teaching and Learning of Science*. Committee on High School Science Laboratories: Role and Vision (National Academy of Sciences, Washington, 2004).
- [2] B. Van Dusen and V. Otero, in: *2012 Physics Education Research Conference*, editado por P.V. Engelhardt, A.D. Churukian e N.S. Rebello (AIP Publishing, Melville, 2013), p. 410-413.
- [3] L.P. Vieira, *Experimentos de Física com Tablets e Smartphones*. Dissertação de Mestrado Profissional em Ensino de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro (2013).
- [4] *Physics Toolbox Accelerometer* (para Android), Vieyra Software, disponível em <https://play.google.com>.
- [5] *Mobile Science - Acceleration* (para iOS), Indiana University, disponível em <https://itunes.apple.com>.
- [6] D.E. Trowbridge e L.C. McDermott, *American Journal of Physics* **49**, 242 (1981).
- [7] A.B. Arons, *Teaching Introductory Physics* (Wiley, Nova Iorque, 1997).
- [8] A.T. Borges, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **19**, 291 (2002).

Obras selecionadas – Serie MNPEF

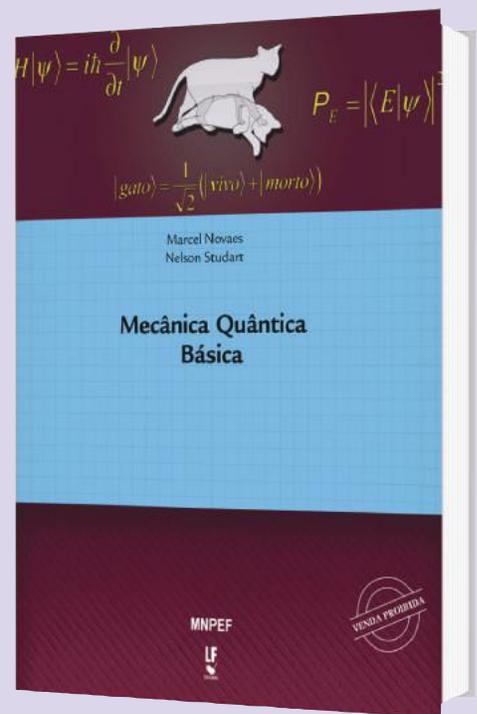
Os livros da Série MNPEF são distribuídos gratuitamente aos professores que frequentam os cursos de pós-graduação em qualquer um dos 60 polos distribuídos pelo país.

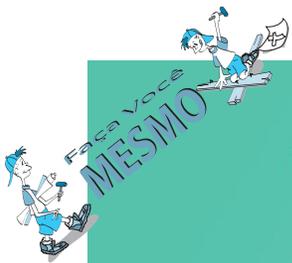
Mecânica Quântica Básica

Autores: Marcel Novaes e Nelson Studart

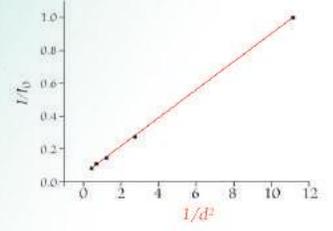
Instituição: Universidade Federal de Uberlândia e Universidade Federal do ABC Paulista

O livro é destinado a docentes professores de física do Ensino Médio, em especial, aqueles alunos do Mestrado Profissional de Ensino de Física (MNPEF) com vistas à aprendizagem de conteúdos específicos e atualização de conhecimentos de física contemporânea. A obra propõe uma abordagem diferente da apresentada nos livros didáticos tradicionais ao descartar a introdução usual de aspectos históricos, ao omitir qualquer referência a modelos clássicos (como o de Bohr) e analogias a sistemas e experimentos clássicos. Abrange conceitos modernos como emaranhamento, descoerência e informação quântica. A obra reconhece a complexidade do ensino da mecânica quântica, mas considera que o conhecimento da física clássica seja um pré-requisito indispensável para a compreensão da mecânica quântica. Esta trata de objetos quânticos (fótons, elétrons, prótons, etc.) descritos por estados quânticos dentro de uma estrutura formal única. A matemática exigida é somente a necessária para a compreensão conceitual. Sugere-se o uso intensivo de tecnologia digital: animações, *applets* e simulações, leituras e consultas a web e deve manter um sistema interativo para comunicação com o professor por meio de redes sociais.





Simple demonstração da lei do inverso do quadrado da distância em sala de aula



M. Lacerda

Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil
E-mail:

A.C.F. Santos

Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil
E-mail: toni@if.ufrj.br

Introdução

A grande maioria dos alunos no ensino médio se encontram cognitivamente no chamado nível operacional concreto [1]. No entanto, muitas aulas espositivas exigem do aluno um nível mais avançado, o nível operacional formal, exigência esta reforçada em várias escolas brasileiras, onde desenhos e equações no quadro negro substituem as demonstrações práticas. Vivemos num país onde o caráter elitista da ciência faz com que qualquer atividade que faça uso das mãos seja visto como destinado apenas às classes menos favorecidas. É prática comum aulas de exercícios substituírem laboratórios e demonstrações. Demonstrações concretas ajudam aos estudantes a entender mais profundamente o que e fazer ciência.

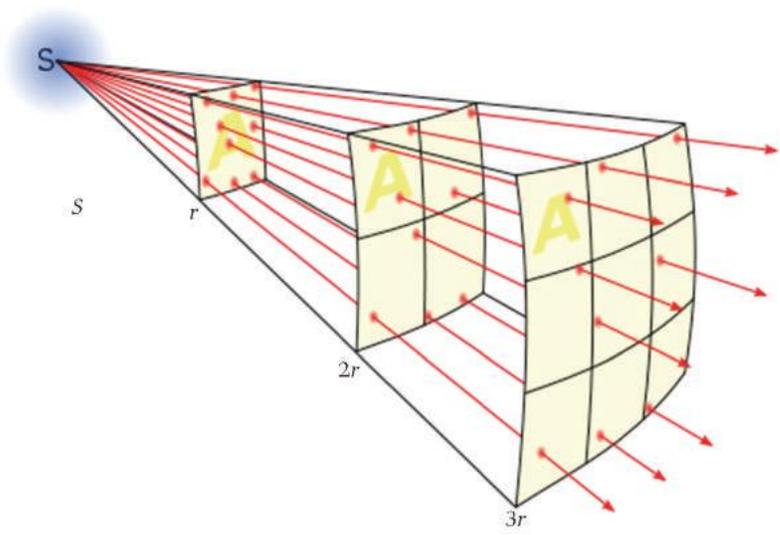
A lei do inverso do quadrado da distância aparece diversas vezes em física. No entanto, muitos estudantes apresentam dificuldades com esta relação. Qualquer fonte pontual que espalha sua influência igualmente em todas as direções sem limi-

tação espacial, vai obedecer à lei do inverso do quadrado da distância. Isto vem de considerações estritamente geométricas, conforme ilustrado na Fig. 1. A intensidade da influência, em qualquer raio r é a intensidade da fonte dividida pela área da esfera.

Na proposição 9 do Livro 1 de *Ad Vitellionem paralipomena, quibus astronomiae pars optica traditur* de 1604 [2], o astrônomo Johannes Kepler argumentou que difusão da luz a partir de uma fonte pontual segue a lei do inverso do quadrado da distância, ou seja

$$I \propto \frac{1}{r^2} \quad (1)$$

Sendo estritamente geométrica na sua origem, a lei do inverso do quadrado se aplica a diversos fenômenos. Fontes pontuais de força gravitacional, campo elétrico, luz, som ou radiação obedecem à lei do inverso do quadrado. A gravitação, é um exemplo de campo que obedece à lei do inverso do quadrado da distância. O campo gravitacional geralmente é apresentado sob a forma mostrada abaixo, que



Como alternativa ao ensino puramente formal e teórico, apresentamos uma prática na qual os alunos participam ativamente. A prática não exige nada mais do que um projetor de slides, equipamento disponível na maioria das escolas para demonstrar a lei do inverso do quadrado da distância em sala de aula.

Figura 1. Ilustração da lei do inverso do quadrado da distância. Fonte: Borb, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3816716>.

mostra que a intensidade da aceleração da gravidade, g , é expressa por

$$g = G \frac{M}{r^2} \quad (2)$$

O mesmo é válido para o campo elétrico de uma carga pontual q

$$E = k \frac{q}{r^2} \quad (3)$$

Do mesmo modo, campos de radiação de um fonte pontual, também obedecem à lei do inverso do quadrado. A intensidade I , com respeito a sua intensidade inicial, a uma dada distância da fonte é dada por

$$I = \frac{I_0}{r^2} \quad (4)$$

Uma aplicação cotidiana é a fotografia. Tudo esta baseado na exposição e no posicionamento relativo do objeto a ser fotografado e a fonte de iluminação, conforme ilustrado na Fig. 2. Como podemos

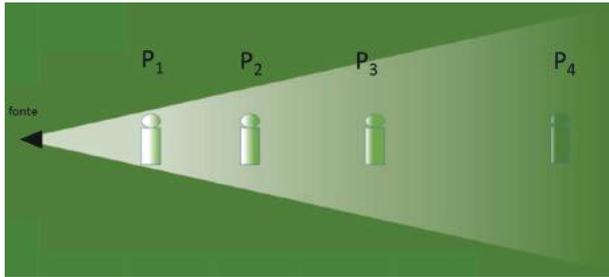


Figura 2. Aplicação da lei do inverso do quadrado da distância em fotografia.

observar, a intensidade da luz é grande nas proximidades da fonte de luz. Assim, para obter uma exposição correta neste caso, é preciso definir a abertura da lente, exemplo F16, de modo a bloquear o excesso de luz.

Se, por outro lado, o objeto a ser fotografado estiver muito longe da luz, então nós definir a nossa abertura para cerca de F4, a fim de deixar mais luz entrar. Assim, ambas as fotografias serão de boa qualidade porque ajustamos nossa câmera para deixar na mesma quantidade de luz para cada uma. Para realçar a exposição do objeto em relação ao cenário, podemos colocar o objeto perto da fonte e o anteparo (cenário) a uma distância maior.

Demonstração

Inicialmente, desenham-se vários pequenos círculos fechados iguais e igualmente espaçados num programa gráfico, por exemplo, no Microsoft Power Point,

conforme ilustrado na Fig. 2. Em seguida, com o auxílio de um projetor, projeta-se o desenho numa folha em branco (A4, por exemplo). Utilizando uma trena, e alinhando a folha de papel com o projetor, mede-se a distância da folha ao projetor e conta-se o número de círculos que são projetados sobre a folha de papel. Repete-se a medida para várias distâncias, por exemplo, a cada 30 cm, conforme ilustrado na Fig. 3.

De modo a investigar a possível dependência com a distância, os alunos podem calcular os logaritmos da razão entre o número de bolinhas projetadas e o número de bolinhas inicial e fazer um gráfico em função do logaritmo da distância. Alternativamente, para a análise dos dados, uma vez que os alunos ainda não estão familiarizados com a utilização da escala logarítmica, pode-se fazer o gráfico da razão entre o número de círculos projetados sobre a folha de papel e o número total de círculos projetados em função do inverso do quadrado da distância, conforme ilustrado na Fig. 4.

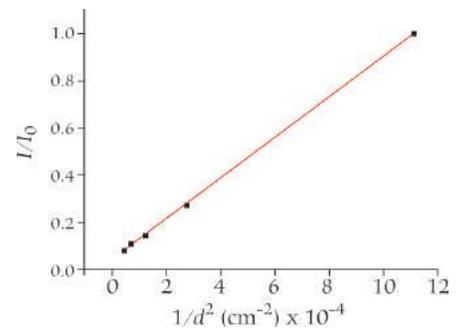


Figura 4. Razão entre o número de círculos projetados sobre a folha de papel (I) e o número de círculos desenhados no Power Point em função do inverso do quadrado da distância da folha de papel ao projetor.

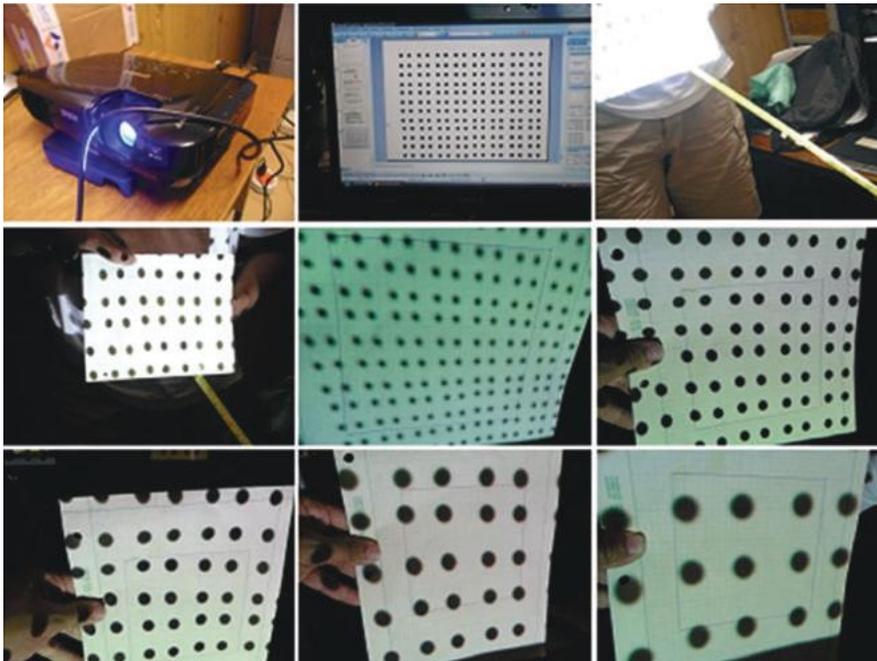


Figura 3. Ilustração do procedimento de medida. A partir da parte superior, da esquerda para a direita, mostra-se o projetor, o desenho dos círculos no Power Point, a medida da distância da folha ao projetor com uma trena, e o número de círculos projetados sobre a folha de papel para várias distâncias.

Conclusões

Este exercício fornece uma atividade simples, do tipo descoberta para alunos do nível médio, através da descoberta da lei do inverso do quadrado da distância. Para alunos com familiaridade com funções logarítmica e exponencial, gráficos do tipo log-log podem ser utilizados.

Referências

- [1] A.B. Arons, *Teaching Introductory Physics* (John Wiley and Sons, New York, 1997).
- [2] O. Gal and R. Chen-Morris, *History of Science* **43**, 391 (2005).

Traçado da cáustica a partir de imagens do *Google Maps*: uma atividade em óptica geométrica para o Ensino Médio

Jair Lúcio Prados Ribeiro

Programa de Pós-Graduação em
Educação em Ciências, Universidade de
Brasília, Brasília, DF, Brasil
E-mail: jairlucio@gmail.com

Introdução

O estudo das imagens formadas por espelhos curvos é um tópico sempre presente na apresentação da óptica do Ensino Médio. A exposição desse conteúdo nos livros didáticos voltados para essa fase de aprendizagem é uniforme, concentrando-se no estudo das imagens conjugadas por espelhos esféricos ditos *gaussianos* [1-9]. A modelagem geométrica e algébrica desses espelhos obedece às condições de aproximação de Gauss, que podem ser resumidas na necessidade de raios paraxiais (próximos ao eixo principal) e em uma pequena curvatura do espelho.

A citação de espelhos cilíndricos é rara [6] nos livros-texto de física do Ensino Médio, apesar de diversos objetos cotidianos (e até mesmo edifícios) espelhados se assemelharem aos mesmos. De forma paradoxal, embora algumas das obras didáticas façam referência somente a espelhos esféricos em seus textos, as mesmas apresentam fotografias de espelhos cilíndricos côncavos ou convexos como exemplos [1,7].

A cáustica, importante aberração monocromática comum em espelhos curvos, também não costuma merecer atenção dessas obras, sendo poucas as menções ao fenômeno [9]. Em um espelho esférico gaussiano, um feixe de raios paralelos ao eixo principal irá convergir no foco de um espelho côncavo (ou divergir a partir do foco de um espelho convexo), um ponto localizado na metade do raio (Fig. 1). Entretanto, em um espelho não-gaussiano, como uma seção circular de uma esfera ou cilindro, esse feixe de raios paralelos não observará convergência ou

divergência total em um único ponto, sendo que o entrecruzamento dos raios se dá ao longo de uma curva característica, chamada cáustica (Fig. 1). Essa aberração pode facilmente ser observada em uma xícara exposta à luz do Sol [10] ou em outro recipiente que tenha formato cilíndrico, conforme mostrado na Fig. 2.

Um detalhamento algébrico sobre a cáustica está disponível em diversos textos [10-12], mas a nosso ver, não é necessária tal apresentação no Ensino Médio, sendo preferível a exposição do tema de forma qualitativa ou experimental. Todavia, discordamos da sua ausência no conteúdo programático, dada a importância de se enfatizar junto aos estudantes que as condições de Gauss são aproximativas. A ênfase nessa simplificação termina por deixar de lado o estudo ou mesmo a menção das aberrações monocromáticas, como a cáustica, a distorção de campo e o astigmatismo, as quais são responsáveis pelos inusitados formatos que as imagens conjugadas por esses espelhos assumem.

Atividade experimental

Em 2005, a empresa estadunidense *Google* lançou o serviço gratuito *Google Maps*, que permite a visualização de mapas e imagens de satélite da Terra em dispositivos ligados à rede mundial de computadores.¹ Desde a sua inauguração, o serviço tem sido explorado como ferramenta didática, assim como seu produto derivado, o *Google Earth*. Por vezes as atividades pedagógicas são mais evidentes, como no estudo de temas da geografia [13] ou geomorfologia [14], mas também há propostas didáticas em campos relativos às ciências naturais, como a medição de distâncias por métodos geométricos [15], o

De forma paradoxal, embora algumas das obras didáticas façam referência somente a espelhos esféricos em seus textos, as mesmas apresentam fotografias de espelhos cilíndricos côncavos ou convexos como exemplos

A ferramenta de busca *Google Maps* exibe fotografias aéreas dos prédios de formato cilíndrico da Procuradoria Geral da República, localizados em Brasília, circundados por projeções de raios de luz refletidos em sua fachada espelhada. Neste artigo, é apresentada uma atividade prática para o traçado da curva cáustica por estudantes de Ensino Médio, a partir do prolongamento das projeções observadas nessas fotografias. A atividade permite estabelecer uma conexão entre os princípios da óptica e a arquitetura, rara na literatura acadêmica.

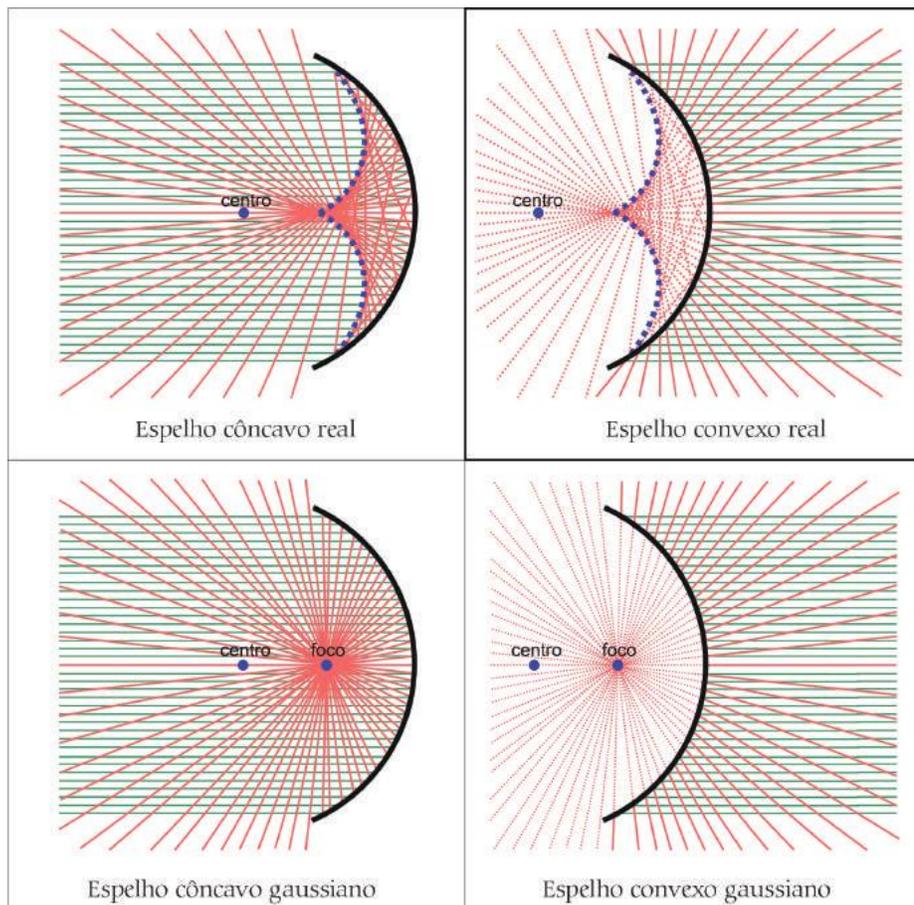


Figura 1. Comparação entre espelhos reais de seção circular e espelhos esféricos gaussianos.



Figura 2. Cáustica de reflexão na superfície côncava interna de um recipiente cilíndrico exposto à incidência da luz solar, conforme sugestão da Ref. [10].

cálculo de velocidades de barcos a partir de leis físicas [16], o estudo de ondas [17], a determinação da declinação magnética de uma localidade [18] ou o significado dos números em pistas de pouso de aviões [18]. Nesse artigo, é proposta uma atividade pedagógica prática de traçado geométrico da curva cáustica por estudantes no Ensino Médio a partir de imagens disponíveis na ferramenta de busca.

Durante a fase de pesquisa para um artigo [19] sobre a modelagem óptica dos prédios da Procuradoria Geral da República (PGR) em Brasília (Fig. 3), observamos um fenômeno luminoso inusitado na imagem disponível no *Google Maps* para os dois edifícios cilíndricos principais que compõem o conjunto arquitetônico da PGR, projetado por Oscar Niemeyer [20]. Ao redor da vista superior do edifício, linhas luminosas estavam projetadas no chão, devido à reflexão da luz solar nas fachadas cilíndricas cobertas por vidros espelhados (Fig. 4).

Foi percebido ainda que as imagens apresentadas pelo *Google Maps* são variáveis: ao acessarmos o sítio uma semana depois, outra fotografia aérea dos edifícios da PGR foi apresentada (Fig. 5), na qual os raios projetados têm maior dimensão. Por vezes, acessamos na mesma data a ferramenta de busca, em máquinas diferentes, e observamos duas fotografias distintas. Entretanto, ambas as imagens obtidas foram consideradas úteis para a atividade prática proposta nesse trabalho, pois, nos dois casos, as fotografias apresentam uma visão superior dos prédios, equivalente a seções transversais circulares dos cilindros refletores.

O fenômeno observado nas imagens aéreas da PGR revelou-se excepcional. Foram buscados na ferramenta outros edifícios também de formato cilíndrico,² para fins de comparação com as edificações da PGR, entretanto nenhuma das fotografias dessas outras edificações revelou a projeção no solo de raios refletidos em suas janelas. Foi percebido que essa ausência pode ser causada por diversos fatores, tais como a baixa resolução das imagens, a pequena área ocupada pelas janelas na fachada, o uso de vidros sem película refletora, o ângulo em que a fotografia foi obtida (resultando em uma vista quase lateral do cilindro, ao invés da vista superior) ou o posicionamento do prédio no terreno, sendo comum que outra construção (ou sua sombra) cubra a área onde os raios refletidos poderiam estar projetados.

Uma impressão da Fig. 5 foi usada no desenvolvimento da atividade prática com estudantes de Ensino Médio, versan-



Figura 3. Visão do conjunto arquitetônico da Procuradoria Geral da República, em Brasília. A película que reveste os vidros não é azul, podendo refletir todo o espectro. Como a fotografia foi obtida em um dia claro e sem nuvens, a imagem refletida do céu forneceu a tonalidade azulada.

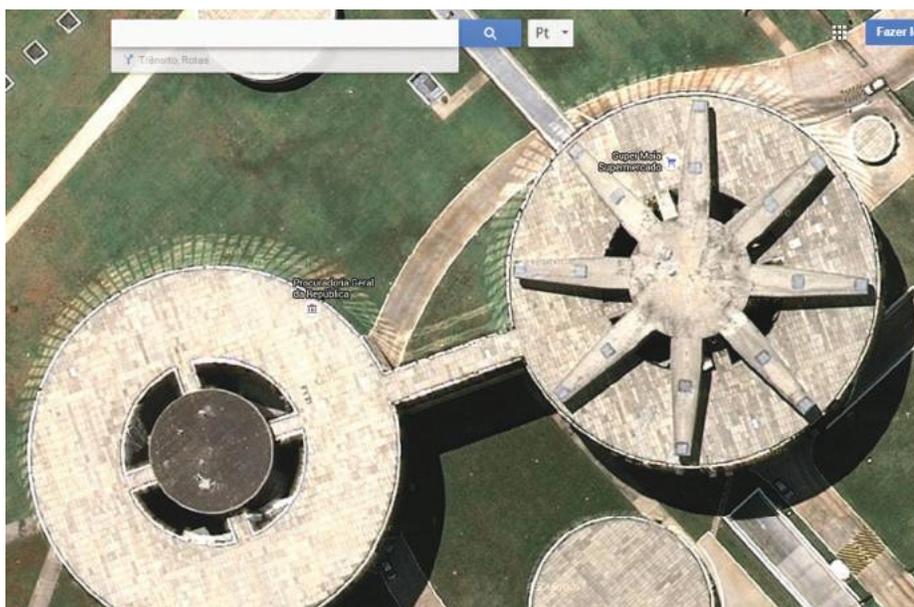


Figura 4. Raios de luz refletidos na fachada da PGR são projetados no solo. Fonte: *Google Maps*, <https://www.google.com.br/maps/@-15.8076342,-47.8595607,143m/data=!3m1!1e3?hl=pt-BR>, acesso 3 maio 2015.

do sobre a cáustica em espelhos convexos e as limitações das aproximações de Gauss. As reproduções da fotografia foram impressas em papel A4 e cobertas com papel de seda. Cada estudante deveria traçar nesse papel transparente, com lápis e régua, os prolongamentos dos raios refletidos e verificar onde estavam locali-

zados os pontos de maior concentração, interligando-os em seguida (Fig. 6).

A Fig. 6 apresenta uma variante digital da atividade realizada pelos alunos, sobre a imagem de apenas um dos prédios da PGR. O traçado dos prolongamentos foi feito por meio de um programa de edição gráfica, para maior precisão. Nessa

figura, é possível perceber que os prolongamentos dos raios de luz não se encontram em um único ponto (foco virtual), como seria esperado em um espelho gaussiano, mas sim ao longo da cáustica, mostrando as limitações das condições de aproximação usadas em óptica para os objetos do cotidiano.

Discussão dos resultados

Durante a atividade, um questionamento se revelou frequente entre os estudantes: em que ponto o prolongamento dos raios deveria ser interrompido? De acordo com a Fig. 1, os feixes podem ser prolongados indefinidamente, sendo a cáustica formada pelos pontos onde a concentração dos feixes da luz refletida é maior. Na atividade proposta, os prolongamentos desenhados a lápis terminam por formar regiões mais escuras, devido à maior concentração de retas em uma região, evidenciando a cáustica. Na Fig. 6, para que a curva se tornasse mais visível, o comprimento dos prolongamentos foi limitado.

A cáustica desenhada pelos estudantes foi comparada com a situação experimental proposta pela Ref. 10 (xícara exposta à radiação solar), para que uma comparação entre os espelhos côncavos (convergentes) e os convexos (divergentes) pudesse ser estabelecida. O traçado da cáustica pelo método descrito permitiu ainda a possibilidade de se encontrar a posição do foco virtual (região de maior concentração dos prolongamentos, resultando em uma mancha escura no papel de seda), sendo possível verificar que essa localização coincide com a aproximação de Gauss (metade do raio). A partir da ligação do centro da seção circular com esse foco, foi possível também determinar a direção aproximada em que o Sol se localizava, no momento da fotografia, em relação à rosa-dos-ventos.

Além do método de traçado da cáustica apresentado, é possível a ampliação da discussão para outros tópicos. Se ambas as imagens forem utilizadas, por exemplo, o tamanho e a posição da sombra podem ser discutidos com os estudantes. Tanto os raios quanto as sombras na Fig. 5 são maiores que aqueles constantes da Fig. 4, indicando diferenças no horário em que as fotografias foram obtidas. Não é possível, entretanto, afirmar de forma categórica o horário em que cada foto foi obtida, pois os momentos do nascente e do poente são variáveis com a época do ano, assim como a “trajetória” apresentada pelo Sol é variável a cada dia. Apesar disso, parece provável que a imagem presente na Fig. 4 tenha sido obtida em



Figura 5. Raios de luz refletidos na fachada da PGR são projetados no solo. Fonte: *Google Maps*, <https://www.google.com.br/maps/@-15.8074881,-47.8592644,72m/data=!3m1!1e3?hl=pt-BR>, acesso 9 maio 2015.

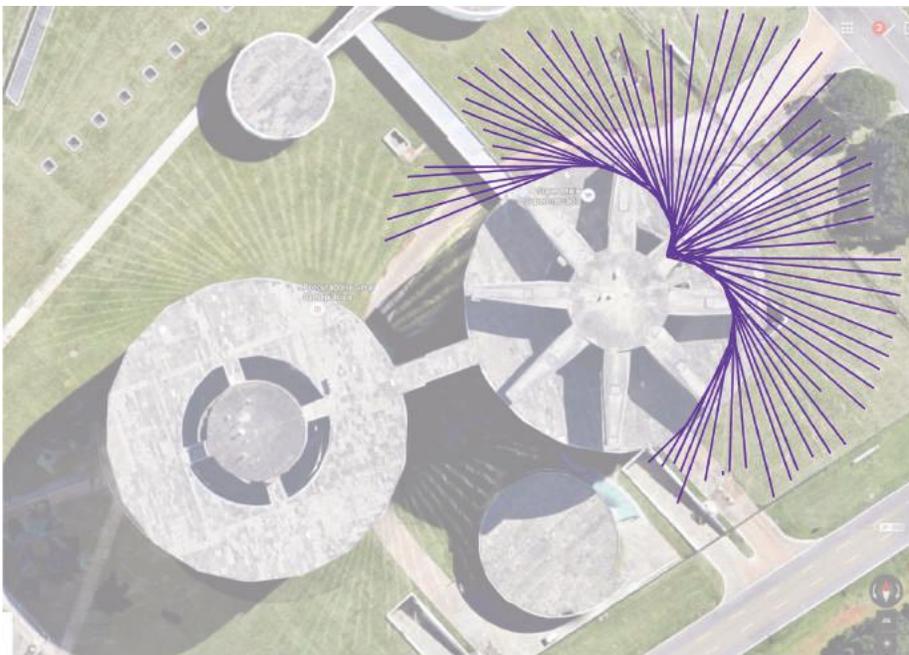


Figura 6. Resultado esperado na atividade didática realizada sobre a Fig. 5, com a visualização da curva cáustica.

um horário próximo à ocorrência do zênite solar (meio-dia), pois tanto a sombra quanto a projeção dos raios refletidos apresentam pequena dimensão, indicando uma incidência quase vertical da radiação solar.

Conclusões e perspectivas

Uma limitação do método apresentado para o traçado da cáustica reside na

captação de uma fotografia plana de uma situação tridimensional. Os raios de luz oriundos do Sol não são paralelos ao eixo principal da seção circular do cilindro, sendo inclinados em relação ao plano horizontal que contém esse eixo. Se projetados em um terreno desnivelado, os prolongamentos dos feixes de luz observados apresentarão distorção e não permitirão que a cáustica seja percebida. A fotografia

também deve ser obtida em uma posição diretamente superior ao edifício, fato que nem sempre é verificado nas imagens do *Google Maps*. O método produziu bons resultados no caso apresentado devido a uma particularidade da projeção quase horizontal dos raios, dada a predileção de Oscar Niemeyer por terrenos bastante planos para seus projetos. Essa horizontalidade minimizou as eventuais distorções que poderiam ser observadas em um terreno com inclinação variável.

Reconhecemos que a utilização de um modelo simplificado, tal como a formação de imagens quando obedecidas as condições de aproximação de Gauss, é vantajosa para a apresentação de temas no Ensino Médio. Entretanto, sempre que possível, as simplificações constantes do modelo devem ser discutidas ou apresentadas para os estudantes. O tradicional lema da óptica geométrica expresso por “raios paralelos ao eixo principal de um espelho se concentram no foco após reflexão” pode se revelar inócua se não puder ser demonstrado por um experimento – ou, no caso descrito, refutado pelo mesmo. A posição do foco no ponto médio do raio da seção transversal, se não evidenciada de forma experimental, pode se revelar para os estudantes como um mero item a ser memorizado.

Esse trabalho buscou ainda mostrar uma conexão interdisciplinar pouco explorada na literatura acadêmica, entre os campos da arquitetura e da física. Acreditamos que a formação dos profissionais dessas áreas seja tão distinta que termina por padronizar o diálogo entre essas linguagens acadêmicas, sendo frequente apenas em temas específicos, tais como o conforto térmico ou acústico de uma edificação. Entretanto, obras arquitetônicas são por vezes as criações artísticas mais usuais no cotidiano de um estudante, por não estarem confinadas a espaços especiais – ao contrário, elas constituem o próprio espaço.

Seja em arranha-céus ou prédios de menores dimensões, fachadas revestidas por vidros refletoras se tornaram uma tônica na arquitetura pós-modernista, ao menos nas grandes cidades, desde os anos 1970. Assim, consideramos relevante que sejam buscadas inovadoras formas de exploração de tal onipresença de superfícies espelhadas de grande dimensão e com formatos variados por professores e pesquisadores da área de ensino da óptica.

Notas

¹Segundo a Ref. [18], a maioria das imagens disponíveis no *Google Maps* são reproduções de fotografias obtidas por aviões equipados com câmeras, e não por

satélites.

²Foram pesquisadas no sítio imagens do Hotel Nacional (Rio de Janeiro), a sede do jornal L'Humanité (Saint-Denis, França),

o hospital Winnie Palmer (Orlando, EUA), o hotel Lakeside Inn (Ontario, Canadá), o McIntyre Medical Sciences Building (Montreal, Canadá), os centros empresariais

Nai Towers (Aichi, Japão) e Azrieli Center Circular Tower (Tel Aviv, Israel) e a sede da companhia Phoenix Co. Inc. (Hartford, EUA).

Referências

- [1] I. Anjos, *Física para o Ensino Médio: Volume Único* (IBEP, São Paulo, 2005), 1ª ed., p. 271-280.
- [2] J. Bonjorno, R. Bonjorno, V. Bonjorno, C. Ramos e L. Alves, *Física: Termologia, Óptica e Ondulatória, Volume 2* (FTD, São Paulo, 2010), 1ª ed., p.222-226.
- [3] L. Guimarães e M. Fonte Boa, *Física: Termologia, Óptica e Ondas* (Galera Hiper-mídia, Niterói, 2005), 1ª ed., p. 211-227.
- [4] O. Guimarães, J. Piqueira e W. Carron, *Física 2* (Ática, São Paulo, 2013), 1ª ed., p. 229-240.
- [5] A. Máximo e B. Alvarenga, *Curso de Física, Volume 2* (Scipione, São Paulo, 2005), 1ª ed., p.172-193.
- [6] M. Pietrocola, A. Pogibin, R. Oliveira e T. Romero, *Física em Contextos: Pessoal, Social e Histórico: Energia, Calor, Imagem e Som: Volume 2* (FTD, São Paulo, 2011), 1ª ed., p. 355-404.
- [7] E. Ramalho, N. Ferraro e P. Toledo, *Os Fundamentos da Física vol. 2 - Termologia, Óptica e Ondas* (Moderna, São Paulo, 2007), 9ª ed., p. 260-283.
- [8] C. Silva e B. Barreto, *Física Aula por Aula Vol. 2* (FTD, São Paulo, 2008), 1ª ed., p. 285-296.
- [9] H. Villas-Bôas, R. Doca e G. Biscuola, *Conecte Física 2* (Saraiva, São Paulo, 2011), 1ª ed., p. 314-334.
- [10] F. Catelli e S. Vicenzi, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **21**, 392 (2004).
- [11] E. Hetch, *Optics* (Pearson, Glenview, 2002), 4ª ed., p. 258-281.
- [12] M. Vollmer and K. Möllmann, *European Journal of Physics* **33**, 1429 (2012).
- [13] T. Patterson, *Journal of Geography* **106**, 145 (2007).
- [14] R. Kripka, L. Viali e R. Lahm, *Revista Latinoamericana de Tecnología Educativa* **13**, 89 (2014).
- [15] M. Vollmer, *Physics Education* **48**, 145 (2013).
- [16] C. Aguiar and A. Souza, *Physics Education* **44**, 624 (2009).
- [17] F. Logiurato, *Physics Education* **47**, 73 (2012).
- [18] W. Baird, C. Padgett and J. Secrest, *Physics Education* **50**, 224 (2014).
- [19] Jair Lúcio Prados Ribeiro, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **32**, 837 (2015).
- [20] *Google Maps*, prédio da Procuradoria Geral da República, <https://www.google.com.br/maps/@-15.8074881,-47.8592644,72m/data=!3m1!1e3!1=pt-BR>, acesso em 22 abril 2015.

Obras selecionadas - Série MNPEF

Os livros da Série MNPEF são distribuídos gratuitamente aos professores que frequentam os cursos de pós-graduação em qualquer um dos 60 polos distribuídos pelo país.

A Construção da Estrutura Conceitual da Física Clássica

Autor: Antony Marco Mota Polito
Instituição: Universidade de Brasília

Pretende-se que o livro seja usado no contexto de uma disciplina de história da física com ênfase em aspectos epistemológicos, em um curso de um semestre. A obra apresenta um panorama do processo de evolução da física por meio de "estudos de caso". Em cada estudo, o relato do desenvolvimento dos conceitos físicos concernentes é realizado concomitantemente a uma análise que tem como pano de fundo ideias oriundas da epistemologia moderna, porém, respeitado o espírito da época.

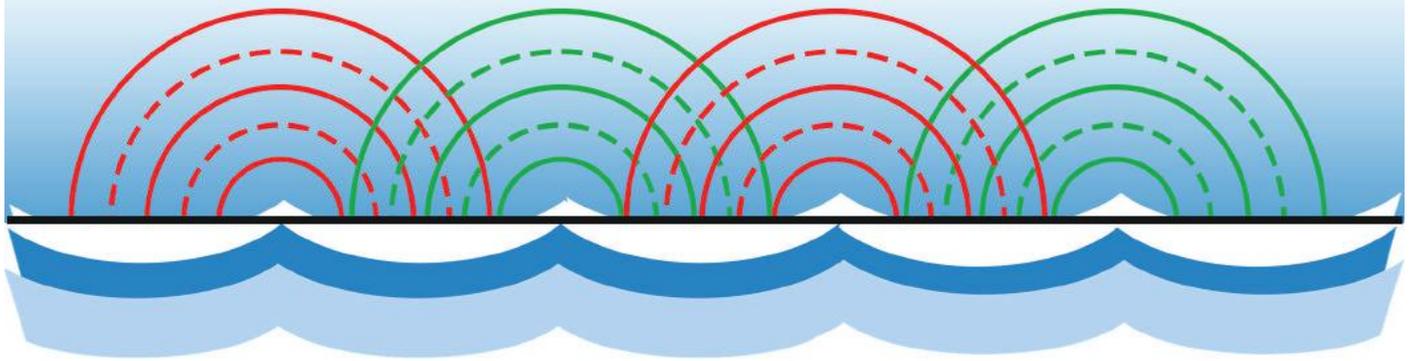
Simulação e Modelagem Computacional com o Software Modellus: Aplicações Práticas para o Ensino de Física

Autor: Marcelo Esteves de Andrade
Instituição: Instituto Federal do Espírito Santo, Campus Cariacica

O objetivo principal do livro é abordar a modelagem computacional como uma ferramenta em potencial para o ensino de física no Ensino Médio, mais especificamente usando o programa Modellus, que é um programa livre e já bem difundido no meio acadêmico mas que não possui nenhuma literatura específica sobre o mesmo para aplicação em sala de aula. Através da junção de uma abordagem teórica e prática, pretendemos apresentar esta ferramenta no contexto de sua aplicação no ensino de física em nível médio e fundamental.



Visualizando a difração e interferência de ondas através do programa *Google Earth*: Discutindo história da ciência e a natureza da luz



.....
Wagner Tadeu Jardim

IFSUDESTEMG, Juiz de Fora, MG,
Brasil

E-mail: wagner.jardim@ifsudestemg.edu.br
.....

Introdução

Muitos pesquisadores defendem a importância de se incluir a História e Filosofia da Ciência (HFC) nos currículos de ensino básico. O objetivo não é incluir tópicos de HFC ou criar uma disciplina à parte, mas trazer elementos significativos desse campo de conhecimento ao ensino, possibilitando trabalhar aspectos relevantes por detrás dos processos de construção do saber científico, trazendo a Natureza da Ciência para a sala de aula [1].

Para contribuir de maneira efetiva para tal propósito, construímos a estratégia de ensino que será apresentada neste artigo. Tal estratégia foi

Pesquisadores defendem a inclusão de tópicos de História e Filosofia da Ciência para trabalhar aspectos relevantes por detrás dos processos de construção do saber científico

aplicada em quatro turmas do 3º ano do Ensino Médio de uma escola pública federal brasileira. Buscamos discutir um tema que sempre instigou a curiosidade humana, a natureza da luz: “onda ou partícula?” nos valendo de um aporte histórico - teorias ópticas de Newton e Huygens e seus desdobramentos - que nos permitisse introduzir em sala de aula, qualitativamente, os conceitos de difração

e interferência de ondas. Todavia, a discussão histórica apresentou algumas fragilidades no que tange à associação feita pelos alunos sobre os modelos corpusculares e ondulatórios aos fenômenos ópticos destacados. Uma questão atribuída a essa dificuldade, e que foi levantada pelos próprios alunos, é que muitas vezes os conceitos trabalhados na disciplina de física se apresentam de forma muito abstrata, o que dificulta sua compreensão. Esse levantamento relativo às dificuldades de abstração nos levou a

reformulação da proposta e a utilização de recursos de Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC) como suporte ao processo. A seguinte descrição se desenvolveu durante o

estudo do tema *ondulatório*, após o estudo acerca de conceitos básicos da eletricidade e eletromagnetismo (Tabela 1).

Principais pontos sobre natureza da luz no Século XVII explorados em sala de aula

Ao iniciarmos a discussão, questionamos os alunos acerca de “o que é a luz?”. Não tendo os alunos conseguido

Apresentamos uma proposta de ensino acerca da natureza da luz, a partir da História e Filosofia da Ciência, discutindo as concepções vibracionais e corpusculares atribuídas à luz do século XVII ao início do XIX. Como suporte aos conceitos relacionados à Ondulatória, utilizamos o Software *Google Earth*, dentre outros recursos. A estratégia adotada, além de despertar o interesse nos alunos, possibilitou visualizar fenômenos como a difração e interferência de ondas, o que facilitou avançar a discussão até a concepção de luz que se firma no século XIX.

Tabela 1. Sequência dos temas de ondulatória trabalhados nas turmas do 3º ano do EM.

Número de aulas (50 min cada)	Conteúdo estudado
2 aulas	• Oscilações e tipos de ondas
3 aulas	• Componentes básicos de uma onda
2 aulas	• Reflexão e refração de ondas
4 aulas	• Presente proposta (difração e interferência de ondas, natureza da luz e das ondas)
3 aulas	• Polarização de ondas, ressonância e fenômenos acústicos
3 aulas	• Fundamentos da relatividade especial e o éter luminífero
3 aulas	• Efeito fotoelétrico e dualidade onda-partícula

formular uma resposta satisfatória acerca da questão levantada, apresentamos a descrição corpuscular do inglês Isaac Newton (1642-1727) e vibracional do Holandês Christiaan Huygens (1629-1695) para a luz na segunda metade do Século XVII, destacando dentre os distintos modelos, suas limitações, poder explicativo e aceitação de cada um [2-4]. Apesar de se tornarem ícones do embate

vibração vs. corpúsculo, buscamos ressaltar que a disputa das teorias de Huygens e Newton não ocorreu de forma tão direta e simples como geralmente é referenciado, nem mesmo contou com apenas esses dois personagens. Além de não terem tanto contato,

seja pessoalmente ou por correspondência, a divulgação de suas obras se deu de maneira diferente e mesmo a forma de abordagem dos fenômenos ópticos foi bastante distinta, “de um lado, Huygens investiu em uma argumentação balizada na geometria e no fenômeno da dupla refração. Do outro, Newton enalteceu o papel dos experimentos e das observações” [4]. A destacar, os estudos desses dois não se atinham aos mesmos objetivos, tendo, por exemplo, Huygens destinado atenção especial aos fenômenos de reflexão, refração e dupla refração, enquanto Newton se dispôs a discutir uma ampla gama de fenômenos. Além disso, ambos os cientistas não destinaram esforços em detalhar de forma aprofundada qual seria a natureza da luz, “... a própria natureza da luz foi assunto controverso e obscuro tanto no *Tratado* [de Huygens] como no *Óptica* [de Newton]. A nenhum dos dois textos pode ser atribuída uma defesa coerente da concepção ondulatória e corpuscular da luz” [4].

Em seu tratado, Huygens atribuiu natureza vibracional¹ para a luz, conseguindo explicar alguns fenômenos relacionados a ela. No entanto, o próprio autor admitiu que não despendeu devida atenção a essa obra, a qual pretendia traduzir para o latim enquanto lhe destinaria maior atenção. “Huygens concebia a luz na forma de uma perturbação mecânica que se propagava através de forças de contato entre corpúsculos” [2]. Devemos nos atentar, no entanto, que sua descrição vibracional não pode ser considerada o que estudamos hoje como teoria ondulatória, o que muitas vezes é feito de forma equivocada. Buscamos destacar junto aos nos-

so alunos do Ensino Médio que o holandês não se utilizou da maioria das características básicas que já havíamos estudado acerca das ondas, não mencionando, por exemplo, frequência de vibração, amplitude, comprimento de onda e período. Nessa linha, buscamos ainda destacar que a defesa de uma concepção vibracional (ondulatória) da luz foi realizada por estudiosos contemporâneos e posteriores a

Huygens e que, em sua maioria, não se apoiaram muito em suas ideias ou apenas citaram-no brevemente, não lhe concedendo posição de destaque em meio a outros trabalhos [4].

O modelo de Newton inferia um tratamento corpuscular para a luz que, além de explicar uma vasta gama de fenômenos observados, ganha aceitação ainda maior por conta do desenvolvimento da química. Todavia, da mesma maneira que Huygens, Isaac Newton não discute em detalhes a natureza da luz, apesar de sua teoria indicar² que ele entendia a luz como sendo composta por partículas materiais que se propagavam no espaço e estariam sujeitos a princípios mecânicos, como forças e colisões. Além disso, a luz seria composta de diversos corpúsculos de luz, e cada qual seria responsável por uma cor. Esses corpúsculos poderiam vir todos de uma mesma cor ou em combinações, assim, a luz verde poderia ser formada por diversos corpúsculos verdes ou pela combinação de amarelos e azuis. Nessa lógica, Newton consegue explicar, por exemplo, a dispersão da luz por prismas. Ao atravessar de um meio para outro, esses corpúsculos estariam submetidos a

forças diferentes e, dessa maneira, os corpúsculos sofreriam desvios diferentes e se separariam. Todavia, “a falta de uma lei universal e satisfatória de força de curto alcance e as dificuldades para explicar os vários fenômenos ópticos de forma

unificada fizeram com que a teoria corpuscular, nesse período (Século XIX), passasse a ser fortemente questionada” [3].

Após apresentar o panorama em que se encontravam as duas teorias, enfatizamos que nosso objetivo não seria a de optar por Newton ou Huygens, mesmo

porque os seguidores da tradição corpuscular e vibracional/ondulatória modificaram conceitos e o que se desenvolve em seguida não é uma mera propagação das ideias originais. O intuito foi o de destacar as divergências na ciência e a não linearidade da mesma. Dessa maneira, levantamos que para pensarmos por nós mesmos, discutiríamos o efeito de difração, fenômeno este que não foi descrito por Huygens em seu *Tratado* e que Newton descreveu no seu Livro III [*Optica*], mas

... exceto as especulativas “Questões”, as observações sobre a difração não seguiram passos indutivos simples [...] e Newton sequer apresentou proposições, provavelmente devido a seu estudo tardio do fenômeno... [4].

Visualizando a difração de ondas através do programa Google Earth

Para avançar no embate proposto, ressaltamos que discutiríamos alguns fenômenos ondulatórios e nós mesmos iríamos avaliar qual seria a definição mais razoável para a luz. Todavia, os alunos haviam manifestado anteriormente certa insatisfação quanto à abstração necessária para o estudo de alguns conceitos. Segundo os estudantes, mesmo que se possa imaginar o que ocorre, a visualização efetiva contribui muito para o entendimento dos fenômenos. Tendo em vista essa problemática levantada pelos alunos, buscamos ferramentas que pudessem nos dar suporte para amenizá-la. Encontramos na utilização das Tecnologias de Informação e Comunicação [6], um caminho que pudesse nos auxiliar a desenvolver a proposta em acordo com a necessidade externada pelos estudantes.

Para discutir a difração de ondas, utilizamos o programa *Google Earth*,³ exibido através de projeção por *data show*, que nos permitiu buscar locais na Terra onde podemos visualizar tal fenômeno ocorrendo com ondas na água. A difração de uma onda é a capacidade que ela tem de contornar um

obstáculo. Podemos perceber esse fenômeno em ondas sonoras quando alguém fala conosco estando em outro cômodo de nossas casas. Nessa situação, se existe uma passagem (porta aberta, por exemplo), mesmo que não estejamos no campo visual de quem fala, conseguimos ouvir,

Em seu tratado, Huygens atribuiu natureza vibracional para a luz, conseguindo explicar alguns fenômenos relacionados a ela. Devemos nos atentar, no entanto, que sua descrição vibracional não pode ser considerada o que estudamos hoje como teoria ondulatória, o que muitas vezes é feito de forma equivocada

O modelo de Newton inferia um tratamento corpuscular para a luz. Todavia, da mesma maneira que Huygens, ele também não discute em detalhes a natureza da luz, apesar de sua teoria indicar que ele entendia a luz como sendo composta por partículas materiais

ou seja, perceber razoavelmente bem as ondas sonoras emitidas pela outra pessoa. Muitos alunos que já haviam escutado algo sobre a luz ser uma onda se manifestaram por não conseguirem exemplificar algum caso em que a difração ocorresse para a luz, ficando, neste momento, em dúvida sobre qual seria o desfecho do embate histórico inicial. Se o que vemos é luz refletida e se a luz fosse uma onda, deveríamos também enxergar a pessoa que nos fala, e não apenas ouvi-la...

Apresentamos então as Figs. 1 e 2 [5], que serviram como primeira ilustração para o efeito. O programa permite que aproximemos a imagem de qualquer lugar do planeta [função zoom], além de proporcionar buscas de localização em diversos períodos de tempo [ícone “mostrar imagens históricas”].

Os alunos se mostraram interessados e foram convidados a conduzir o programa,⁴ buscando pelo globo, outros locais onde pudéssemos visualizar a difração das ondas. Dentre as buscas realizadas pelos alunos, apresentamos alguns exemplos de locais identificados por eles, visualizados em sala e registrados para o presente trabalho (Figs. 3, 4, 5 e 6).

Após explorarmos o conceito de difração, analisamos as circunstâncias em que o comprimento de onda (λ) em relação à largura do obstáculo (L) nos fornecia a observação do fenômeno. Para isso, utilizamos uma simulação⁵ que permite alterar a frequência da onda produzida (consequentemente⁶ seu λ), bem como a largura das frestas por onde as ondas irão atravessar. Nesse momento da simulação, alguns alunos se manifestaram a favor de um modelo mecânico e corpuscular para a luz, uma vez que, segundo eles, a luz não poderia apresentar o observado. Os alunos conseguiram perceber, no entanto, que se diminuíssemos ou aumentássemos demasiadamente a largura dos obstáculos, a difração cessava. Formalizamos aqui a condição necessária para que ocorra a difração de uma onda. Isto é, para que o fenômeno de difração ocorra, é necessário que o comprimento de onda⁷ (λ) seja da mesma ordem de grandeza do obstáculo a ser contornado. Para o som, essa condição é satisfeita para a maioria dos obstáculos presentes no nosso cotidiano. Podemos observar também, no lado direito da figura, faixas em que as ondas não são visíveis, o que pode ser explicado pelo fato de uma onda estar se sobrepondo à crista da outra, ou seja, o fenômeno de interferência destrutiva.

Simulando o experimento de Young

Para avançar na discussão, falamos sobre Thomas Young (1773-1829) que,

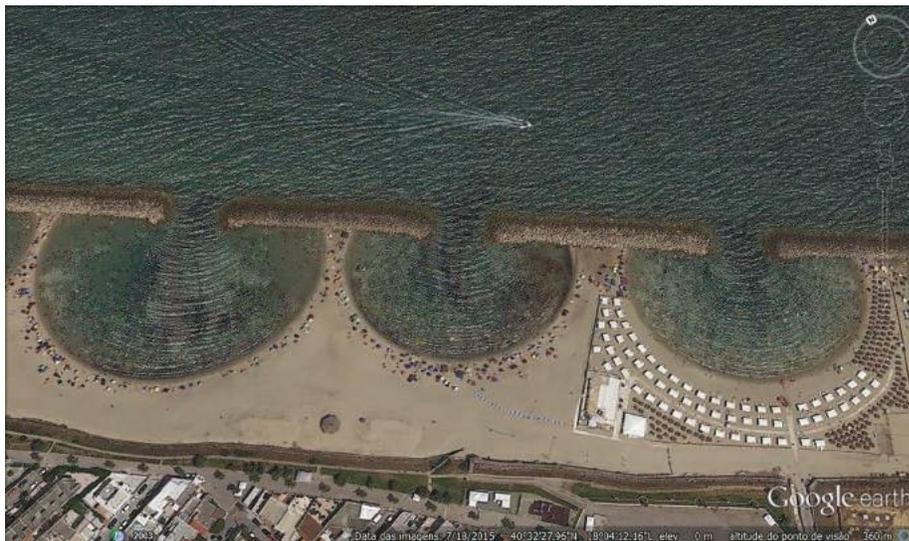


Figura 1. Difração de ondas através de aberturas; Campo di Mare, Itália. Coordenadas: 40°32'26.98"N 18°04'14.47" L.

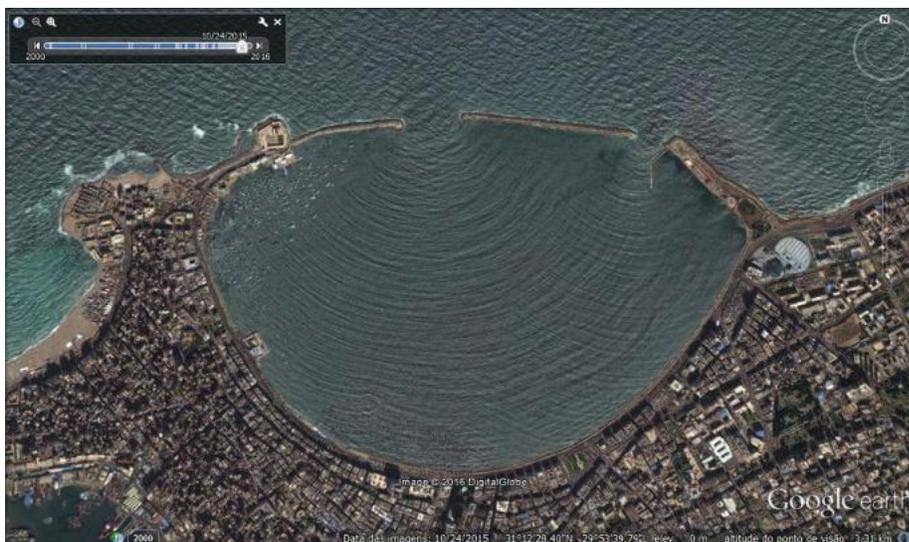


Figura 2. Difração de ondas através de abertura; Alexandria, Egito. Coordenadas: 31°12'25.80" N 29°53'39.94" L.

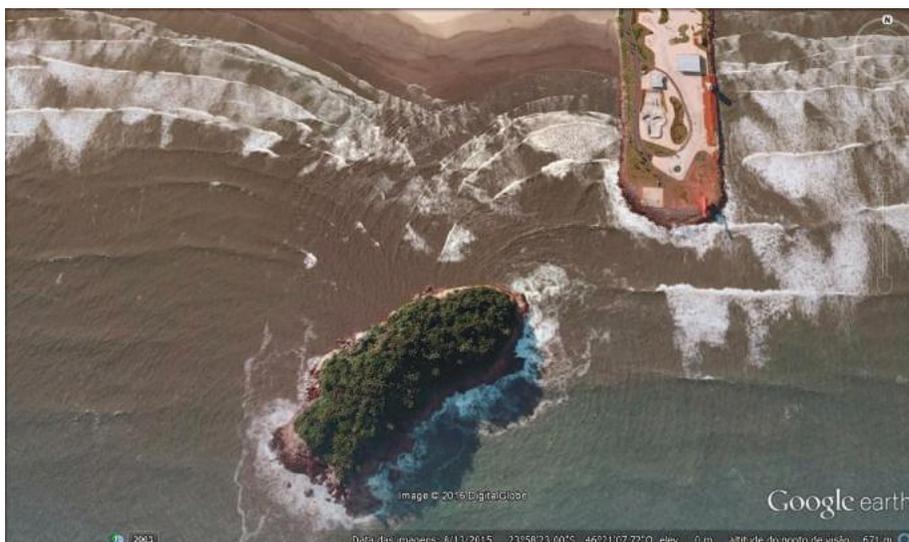


Figura 3. Itararé, São Vicente - SP Brasil. Coordenadas 23°58'24.06"S 46°21'09.02".

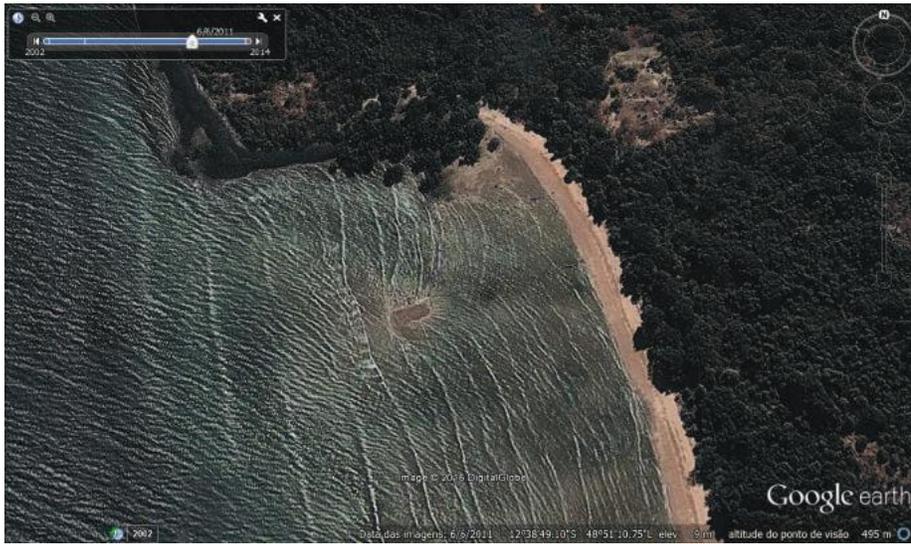


Figura 4. Difração de ondas ao contornar um obstáculo. Madagascar, próximo a Ankazomalemby. Coordenadas: 12°38'48.79" S 48°51'09.69" L.



Figura 5. Difração de ondas através de aberturas. Okinawa, Japão. Coordenadas 26°10'41.10" N 127°49'45.28" L.

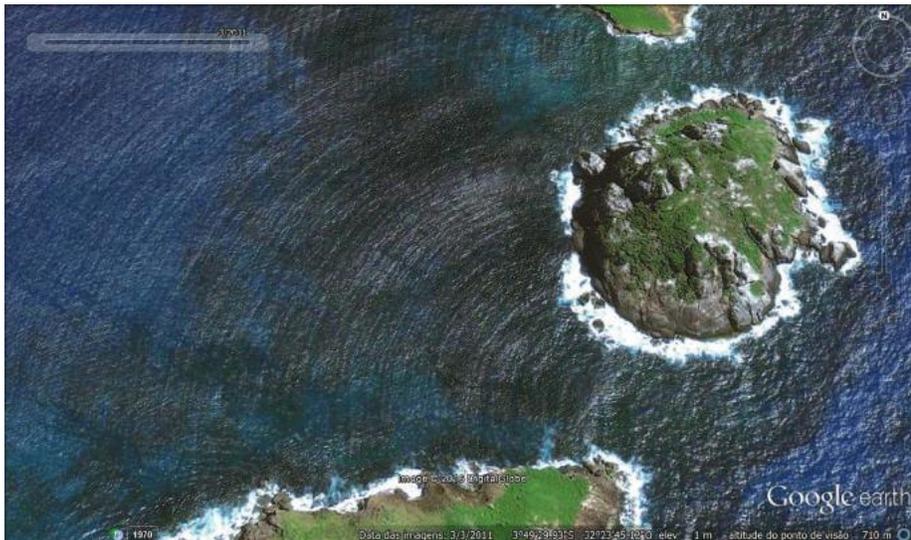


Figura 6. Difração de ondas através de abertura. Próximo a Fernando de Noronha. Coordenadas: 3°49'33.23" S 32°23'40.56" O.

em 1800, divulga seus primeiros argumentos a favor de uma concepção ondulatória da luz mencionando o trabalho de Huygens, mas se apoiando muito mais nos estudos realizados por Euler. Nesse contexto onde a teoria corpuscular dos seguidores da tradição Newtoniana era amplamente aceita, defender uma concepção ondulatória não era algo simples. Young, em 1802 publica um trabalho onde defende de maneira mais aberta a natureza da luz como onda. Para isso, ele se estrutura nos trabalhos de Huygens, Euler e mesmo o de Newton. "Enquanto Huygens foi pouco referenciado, Newton ocupou amplo espaço na argumentação de Young. Ele inseriu uma série de trechos do *Óptica* e de outros escritos pelo inglês, sempre com o intuito de fundamentar sua argumentação" [4], possivelmente para não ter suas ideias rejeitadas de prontidão pelos Newtonianos. No intuito de avançar na discussão, ressaltamos que, em meio a esse contexto, Thomas Young, em 1801, realiza um experimento, conhecido como experimento de dupla fenda, que se torna muito famoso (o qual simulamos na sessão anterior), que visava a verificar a difração e interferência da luz.

Para reproduzir a ideia por detrás da montagem de Young, utilizamos um laser de luz verde⁸ ($\lambda = 532 \text{ nm}$) e apontamos o feixe para a parede (Fig. 8). Posicionando um fio de cabelo (cedido por uma das alunas) em frente à saída do feixe luminoso, verificamos, na parede, o padrão da Fig. 9, que é exatamente o mesmo apresentado na simulação. Ao passar pelo fio de cabelo (que serve como o obstáculo central da Fig. 7), o feixe se divide em dois feixes independentes que se difratam e se interferem. Podemos notar o surgimento de uma linha tracejada, ou franjas de interferência. No traço, a ausência de luz representa a interferência destrutiva, e os pontos luminosos, a interferência construtiva.

Aqui comentamos que não verificamos o fenômeno de difração para a luz visível no dia a dia por conta de seu comprimento de onda que é muito pequeno (aproximadamente entre 400 nm e 750 nm) em relação aos obstáculos a serem contornados, resgatando as conclusões acerca do efeito de difração discutidas anteriormente na simulação. Para os alunos, o fenômeno de interferência em conjunto com o de difração, não poderia ser explicado caso a luz fosse composta, segundo um comentário, de "bolinhas de matéria", alterando as suposições lançadas ao iniciarem os trabalhos com o simulador.

Conclusão

A proposta tinha o intuito de se uti-

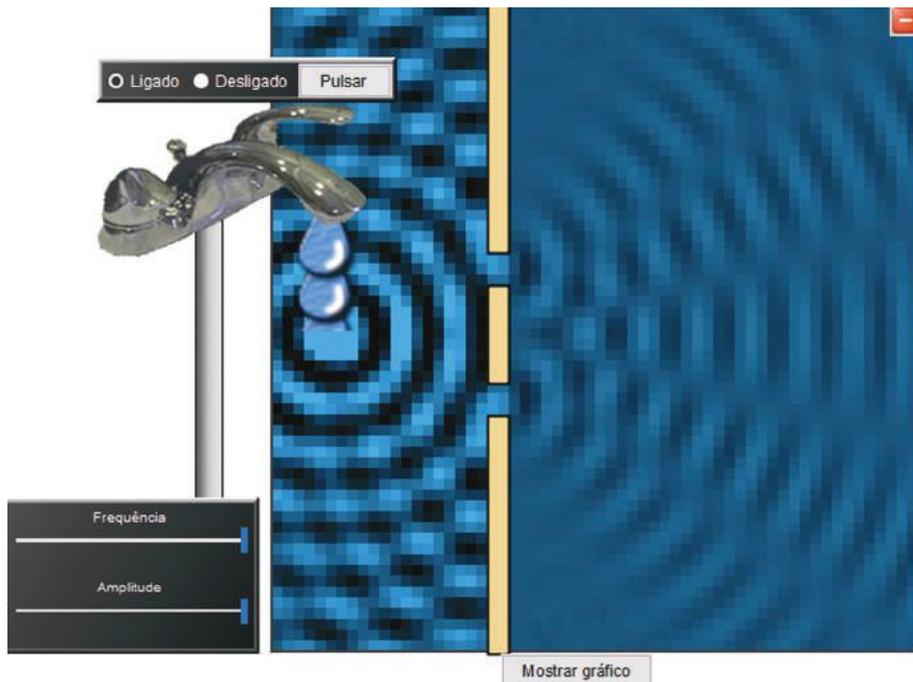


Figura 7. Simulação; difração e interferência de ondas.



Figura 8. Feixe de luz monocromática verde projetado sobre a parede em ambiente de baixa iluminação.

lizar apenas do aporte histórico para se discutir a natureza da luz em sala de aula. No entanto, algumas inserções baseadas nas TICs surgiram com base nas angústias levantadas pelos próprios alunos. Assim, construímos essa sequência de trabalho, utilizando ferramentas simples e que despertaram o interesse dos estudantes. A experiência se mostrou muito enriquecedora para o ambiente escolar, pois, da mesma maneira que diversos cientistas associavam modelos corpusculares e ondulatórios/vibracionais para descrever a luz, o programa *Google Earth* e demais recursos permitiram aos alunos interagirem de maneira efetiva, se tornando parte da reflexão construída e conduzindo as observações realizadas até a conclusão alcançada no momento descrito: a luz tem

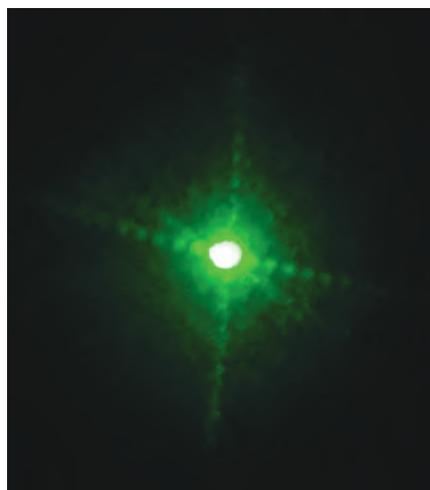


Figura 9. Franjas de Interferência formada por difração e interferência da luz.

comportamento ondulatório.

Vale ressaltar que, ao final do processo, quando os alunos estavam convencidos de que a luz deveria ser descrita como onda, eles externaram de maneira geral em seu discurso e em uma avaliação aplicada, que a descrição ondulatória da luz proposta por Euler e posteriormente por Young naquele contexto não poderiam ser equivalentes à apresentada por Huygens no Século XVII, pois as ideias sofreram modificações e reformulações, sendo apoiadas em alicerces distintos. Acreditamos, assim, ter conseguido trazer para sala de aula elementos de natureza da ciência que supõem a construção do conhecimento científico de maneira não

linear e apenas acumulativa. Finalizamos a discussão, nesse momento, ressaltando que nas aulas de física moderna (Tabela 1) voltaríamos a rediscutir a natureza da luz.

Notas

¹Não devemos confundir com o conceito de onda eletromagnética. No contexto em questão, Huygens fez analogia às ondas sonoras, todavia, para ele, a luz necessitaria de outro meio que não o ar; esse meio seria o éter, que deveria permear todo o espaço.

²Utilizamos a palavra “indica”, pois Newton nunca deixou totalmente explícito o que entendia pela luz; todavia, diversos seguidores de sua teoria, tais como John Harris e John Rowning, fizeram essa interpretação. Existem fenômenos nas obras de Newton que não seriam compatíveis com a ideia de luz como matéria.

³O programa pode ser baixado gratuitamente <http://www.google.com.br/intl/pt-PT/earth/> e instalado no computador.

⁴Como o tempo de busca por locais onde o efeito de difração é visível pode ser longo, recomendamos que o professor, de antemão, já tenha à sua disposição coordenadas de alguns locais, tais como as que apresentamos no presente trabalho, para que isso possa poupar tempo de aula.

⁵Essa e outras simulações sobre outros conteúdos científicos podem ser acessadas gratuitamente em <http://phet.colorado.edu/pt>.

⁶A relação básica “velocidade = comprimento de onda \times frequência”, já havia sido trabalhada com os alunos.

⁷As características básicas de uma onda, tais como amplitude, comprimento de onda, velocidade e frequência, bem como o fenômeno de interferência, já haviam sido trabalhadas na aula anterior.

⁸O laser de luz monocromática vermelha permite a mesma visualização. Todavia entre as duas opções, escolhermos a luz verde por conta de o equipamento apresentar maior potência, facilitando a visualização do fenômeno.

Referências

- [1] H.R.A. Silva e A. Guerra, Caderno Brasileiro de Ensino de Física **32**, 378 (2015).
- [2] F.W.O. Silva, Revista Brasileira de Ensino de Física **29**, 149 (2007).
- [3] C.C. Silva e B.A. Moura, Revista Brasileira de Ensino de Física **30**, 1602 (2008).
- [4] B.A. Moura, Caderno Brasileiro de Ensino de Física **33**, 111 (2016).
- [5] F. Logiurato, arXiv:1201.0001v1 [physics.ed-ph].
- [6] J.P. Da Ponte, Revista Iberoamericana de Educación **24**, 63 (2000).



Estudo das cores com o Arduino Scratch e Tracker

.....

Marisa Almeida Cavalcante

Grupo de Pesquisa em Ensino de Física,
Departamento de Física, Pontifícia
Universidade Católica de São Paulo,
São Paulo, SP, Brasil
E-mail: marisac@pucsp.br

Anderson de Castro Teixeira

Departamento de Física, Pontifícia
Universidade Católica de São Paulo,
São Paulo, SP, Brasil
E-mail: andersont_5@hotmail.com

Mariana Balaton

Departamento de Física, Pontifícia
Universidade Católica de São Paulo,
São Paulo, SP, Brasil
E-mail: marybalaton@hotmail.com

.....

Introdução

O computador tem se tornado uma ferramenta cada vez mais frequente no Ensino de Física. O caso mais comum é a utilização de animações e simuladores, em que o aluno observa um determinado modelo e interage alterando variáveis a fim de obter resultados para confirmar uma determinada teoria.

Neste mesmo caminho podemos destacar também a modelagem computacional e análise de vídeo. A primeira se caracteriza pela aplicação de modelos matemáticos relacionados a determinado fenômeno e resultados gerados por ele. Já na análise de vídeo, onde se destaca o *software* Tracker [1], permite a filmagem e análise em milésimos de segundo do fenômeno que se quer analisar.

Com a mesma função, a entrada USB combinada com placas de aquisição de dados tem se tornado uma alternativa interessante, por proporcionar segurança e facilidade para conexão de diferentes sensores digitais ou analógicos cuja característica fundamental consiste na variação de sua resistência em função da grandeza física que se pretende medir.

Entretanto, apesar da variedade de opções a sua implementação em sala de aula esbarra tanto na falta de informação por parte de professores como na ausência de recursos financeiros das escolas.

A placa Arduino [2] tem se destacado entre as ferramentas baseadas em *softwares* e *hardwares* livres por sua simplicidade e baixo custo, apesar de necessitar de algum conhecimento em programação.

O *software* Scratch [3] desenvolvido pelo MIT surgiu com uma excelente opção

para facilitar a inserção de linguagem e programação e particularmente para as crianças tem se mostrado uma ferramenta poderosa, não apenas para o ensino de programação, mas também para o ensino de Matemática e Ciências, já que a lógica permeia estas áreas de conhecimento.

Neste trabalho utilizamos o *Scratch for Arduino S4A* [3], uma modificação do Scratch, que permite fácil programação da plataforma de *hardware* aberto Arduino. Estruturamos também a análise de espectros utilizando o *software* Tracker de tal modo que podemos não apenas analisar o fenômeno do ponto de vista qualitativo, mas também quantitativamente, ampliando o leque de possibilidades.

Arduino

O Arduino é uma plataforma de código aberto baseada em *hardware* e *software* livre. Possui suporte à conexão USB com o computador, permitindo a interação entre este e o ambiente através de dispositivos eletrônicos. Se destaca por apresentar um menor custo somado a facilidade de uso quando comparado com outros disponíveis semelhantes no mercado.

A plataforma consiste em uma placa com circuitos de entrada/saída para um microcontrolador

AVR, um ambiente de desenvolvimento e o *bootloader* que já vem gravado no microcontrolador.

O microcontrolador tem um processador, memória e periféricos de entrada/saída, podendo ser programado para funções específicas.

Ele é programado usando a linguagem de programação do Arduino baseada no Wiring (syntax + libraries), similar ao C++ com algumas simplificações e

Experimentos em espectroscopia não estão restritos a laboratórios com caros equipamentos. Com auxílio de um computador e programas livres é possível montar um experimento para o entendimento dos conceitos físicos ligados à luz e às cores

Este trabalho apresenta um experimento de espectroscopia didático de baixo custo e fácil montagem para auxiliar o entendimento dos conceitos físicos ligados à luz e às cores. Para uma análise quantitativa usamos a plataforma livre Arduino, e linguagem de programação “em blocos” *Scratch for Arduino* (S4A). Esta linguagem é destinada àqueles que mesmo sem domínio de sintaxe ou maior conhecimento técnico, possam desenvolver programas com diferentes graus de complexidade. Para análise espectral quantitativa, apresentamos a opção do uso do *software* Tracker de análise de vídeos como ferramenta para a determinação dos comprimentos de onda envolvidos. Neste artigo apresentaremos links para acesso a vídeos aplicativos e a instalação de cada um dos *softwares*, bem como tutoriais e atividades que permitam ao leitor reproduzir o experimento.

modificações, e ambiente de processamento baseada no Processing. Sua IDE (*Integrated Development Environment*) está disponível em seu site.

Por se tratar de uma plataforma de desenvolvimento totalmente livre, existe uma vasta variação de versões, entre elas UNO, Duemilanove, NG, Mega, Nano, etc.

O Arduino UNO possui uma placa microcontroladora ATmega328 e um modelo padrão, ou seja, possui pinagem fêmea. Isso traz uma grande vantagem, pois a maioria dos shields e sensores, como por exemplo, placas de rede Ethernet, módulos para motores, conexão sem fio do tipo Xbee, etc, vêm para este padrão [4]. Os sensores analógicos podem ser conectados em uma das seis portas analógicas disponíveis no Arduino. Para a determinação das tensões oferecidas por estes sensores o Arduino é composto por um conversor A/D de 10 bits, o que lhe atribui uma resolução de 1 parte em 1024.

Há também 14 portas digitais que podem ser usados como entrada ou saída usando as funções `pinMode()`, `digitalWrite()`, e `digitalRead()`. Caso necessário, seis delas podem ser utilizada como saída analógica PWM (Pulse-Width Modulation) com a função `analogWrite()`, que simula um sinal analógico com resolução de 8 bits.

Scratch for Arduino (S4A)

O Scratch é uma linguagem de programação iconográfica desenvolvida no MIT (Massachusetts Institute of Technology) para crianças com finalidade de ajudar a desenvolver o raciocínio lógico/matemático.

O S4A desenvolvido em 2010 pela equipe de Smalltalk do Citilab é uma modificação do Scratch que permite a programação com o Arduino de forma simples. Tal como o Scratch, utiliza interface gráfica e módulos de programação em blocos o que o torna muito fácil e intuitivo. Para “programar” basta encaixar os blocos como um brinquedo de montar, quebra cabeças, dentro de uma estrutura lógica. Os blocos são separados por cores de acordo com suas funções e para cada função temos uma série de comandos que podem ser agrupados livremente caso se encaixem.

Tracker

Tracker é uma ferramenta gratuita de análise de vídeo e fotos criado por D. Brown e desenvolvido na plataforma *Open Source Physics* (OSP) e Java pelo Cabrillo College.

Ele permite modelar e analisar o mo-

Links para tutoriais e instalações de softwares

S4A

S4A *Firmware* (download)

Comandos básicos: Ref. [5], <https://goo.gl/DOHc0J>

Instalação do *Firmware*: Ref. [6], <http://goo.gl/8HyPRR>

Instalação do *Firmware* na IDE Arduino (tutorial): Ref. [7], <https://goo.gl/0vrVKR>

Tracker

Tutorial para análise espectral com rede de difração

Ref. [8], <https://goo.gl/mqCvfx>

Arduino

Para baixar e instalar o *software*

Ref. [9], <https://www.arduino.cc/en/Main/Software>

vimento de objetos em vídeo como também padrões de interferência e espectros através da ferramenta de análise região RGB.

Suas ferramentas de calibração permitem boa precisão na análise dos mais variados experimentos e particularmente apresentamos sua utilização para análise espectral com o uso de rede de difração.

LED RGB

Ele é constituído de três pastilhas semicondutoras de LEDs correspondentes as cores; vermelha, verde e azul, em que podemos controlar a corrente em cada um e assim gerar determinadas cores.

Cada uma dessas cores pode ser descrita pela indicação da quantidade % dessas três cores primárias, que podem variar de um mínimo até um máximo.

Para o caso do uso das portas PWM do Arduino a representação é realizada numa escala de 0 a 255 (8 bits; 2⁸ possibilidades). Dessa forma podemos obter algumas combinações em um LED

RGB, onde 0 representa corrente mínima e 255; tensão máxima aplicada aos terminais da pastilha correspondente:

Branco - RGB (255,255,255);

Azul - RGB (0,0,255);

Vermelho - RGB (255,0,0);

Verde - RGB (0,255,0);

Amarelo - RGB (255,255,0);

Magenta - RGB (255,0,255);

Ciano - RGB (0,255,255);

Luz, cor e suas percepções

Em primeira instancia para haver cor é necessário que antes haja luz sobre um dado objeto e, naturalmente, um observador. É preciso salientar ainda que a percepção da cor depende do observador e suas experiências anteriores. Quando a luz branca (todas as cores do espectro visível) atinge um objeto qualquer capaz de absorver algumas cores e refletir outras do espectro visível, o observador tem a sensação óptica de cor (Fig. 1).

A mistura de cores primárias (verde, vermelho e azul) por adição (em fundo

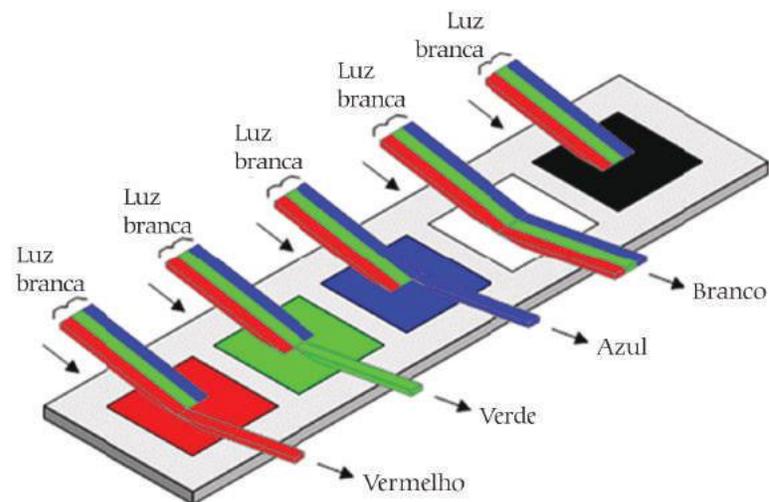


Figura 1. Absorção da luz em diversas cores (<https://fisc4.wordpress.com/2015/05/03/absorcao-da-luz-e-transparencia-de-objetos/>).

escuro) produz-se as cores secundárias. Da mistura por subtração (em fundo claro) das cores secundárias (ciano, magenta e amarelo) obtém-se novamente as cores primárias. Da mistura em diferentes proporções destas cores obtém-se quase todas as cores do espectro visível (Fig.2).

Em pesquisa feita por Melchior e Pacca [10] se percebeu que os alunos entrevistados explicam a cor de 4 formas básicas:

“O uso de modelos alternativos de visão: As concepções de visão e cor se associam, criando modelos explicativos que diferem dos modelos científicos com a relação aos conceitos físicos, fisiológicos e psicofísicos. A experiência com a mistura de tintas: Parece haver uma forte relação, estabelecida pelos sujeitos da pesquisa, entre cor e tinta. Misturas de cor são tratadas como misturas de pigmentos, provavelmente devido a experiências cotidianas. A física previamente estudada: O ensino gera concepções híbridas que diferem dos modelos físicos aceitos. Além disso, o uso apenas do conhecimento físico não é suficiente para entender a cor. O foco limitado em uma das componentes da cor: Nos modelos alternativos, a cor não é entendida como fruto das relações entre suas três componentes, as respostas parecem centrar-se em uma delas.”

Assim percebemos que mesmo os indivíduos que já tinham estudado previamente o assunto não tiveram argumentos suficientes para explicar o que é a luz, cor e qual a relação entre elas.

A escolha deste tema é, portanto, muito pertinente e permite ampliar o leque de recursos didáticos disponíveis aos professores na tentativa de facilitar a compreensão deste assunto em geral bastante polêmico e confuso.

Experimento realizado

O experimento consiste em utilizar a placa Arduino em conjunto com outros

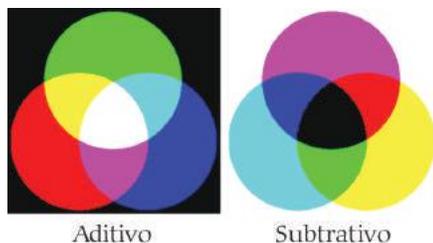


Figura 2. Mistura de cores (<http://designcriarte.blogspot.com.br/2013/10/percepcao-das-cores.html>).

Vídeos tutoriais

Construção da caixinha: Ref. [15], <http://goo.gl/Oi7Whb>

Determinação da distância entre os sulcos do CD: Ref. [16], <http://goo.gl/vq0r09>

dois softwares livres, Scratch e Tracker Analysis, para obter resultados qualitativos e quantitativos no estudo de composição de cores.

Reproduzimos a montagem desenvolvida por Cavalcante *et al.* [11-14] com uma caixa de presente (Fig. 3) de lados 13 cm e 7 cm de altura e para a decomposição da luz utiliza-se um pedaço de CD desprovido da película refletora. A presença da tampa possibilitou que, tanto o CD quando o anteparo fosse devidamente encaixado de modo a serem ajustados até obter-se uma boa visualização.

Como fonte de luz utilizamos um LED RGB que consiste na adição das cores Vermelho (Red), Verde (Green) e Azul

(Blue). Como vimos, essas cores primárias somam-se para criar outras cores: Amarelo (Vermelho + Verde), Ciano (Verde + Azul) e Magenta (Azul + Vermelho), Branco (Vermelho + Azul + Verde).

Isso foi feito conectando cada terminal do LED, associados a uma resistência através de um conector do tipo sindal (Fig.4), nas entradas digitais 5, 6 e 9 da placa Arduino, que correspondem a saídas digitais PWM, ou seja, simulam sinais analógicos de 8 bits. O terminal maior, no caso em particular anodo, é comum aos outros e é conectado na entrada de 5 V.

Dessa forma ao direcionarmos a luz do LED (que nesse momento será branca)

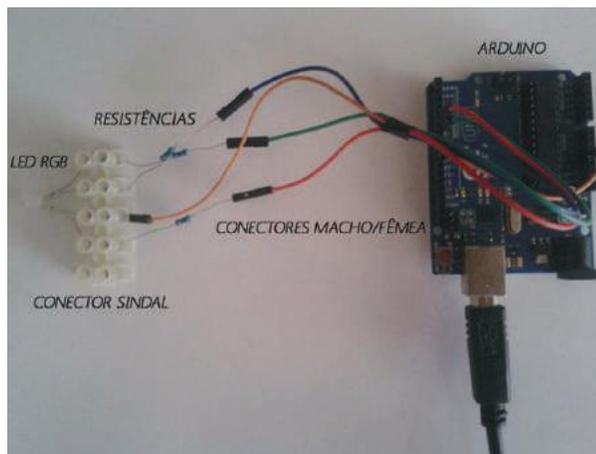


Figura 4. LED RGB conectado nas entradas digitais e na fonte de alimentação de 5 V. Para os terminais referentes a cor verde e azul, utilizamos resistências de 150 Ohms. Já no terminal referente a cor vermelha utilizamos uma resistência de 220 Ohms.



Figura 3. Detalhe da montagem.

na fenda iremos observar através do CD o espectro projetado no anteparo, onde aparecerão cores; vermelho, verde e azul.

Para obter diferentes composições de cores iremos agora introduzir o S4A. Antes, para que possamos desenvolver a programação no ambiente do mesmo é necessário fazer o upload de no Arduino de um programa específico conhecido por *Firmware* (ver Ref. [5]), que terá a função de estabelecer o intercâmbio entre a interface gráfica Scratch e a IDE do Arduino. Podemos dizer popularmente que após este upload o “Arduino está pronto” para receber os comandos via interface S4A.

Após este procedimento, ao conectar a placa Arduino na entrada USB ela será reconhecida no S4A e podemos utilizar os blocos para os mais variados comandos.

Disponibilizamos a programação desenvolvida na Ref. [17]. Ela é bastante intuitiva e utiliza essencialmente as ferramentas básicas do *software*.

No entanto, é importante fazer uma pequena observação: ao abrir o aplicativo com extensão “.sb” teremos para os primeiros blocos (Fig. 5) que permitem variar a intensidade de cada cor para o LED RGB.

Observe que efetuamos uma operação matemática do tipo:

Analog9 -> corresponde à 255-variável azul

Esta subtração é necessária por se tratar de um LED com “anodo comum”. Para um LED anodo comum o valor 255 na porta de saída PWM corresponde a uma diferença de potencial mínima (apagado) para a pastilha correspondente e em contrapartida o valor 0 corresponde ao maior valor de ddp possível (acesso com intensidade máxima).

Para executar o aplicativo basta clicar na bandeira verde que se encontra no canto superior direito. Alterando as escalas de cada variável entre 0 e 255, como dito anteriormente, a cor do LED RGB será alterada, como também o espectro projetado.

Para tornar a experiência mais dinâmica e interativa introduzimos o uso de



Figura 5. Blocos de programação no S4A para variar a intensidade de cada pastilha no LED RGB.

uma câmera de vídeo conectada ao PC. Caso não se disponha de webcam, é possível com DroidCam [18] instalado em um aparelho de telefonia móvel, (com sistema operacional Android na versão 1.6 ou superior) e também no PC transformar a câmera do aparelho em webcam via sinal de Wi-fi, USB ou Bluetooth. A Fig. 7 mostra a tela observada no PC.

Dessa forma, ao posicioná-lo em dire-

ção ao cd, será possível observar, com janelas paralelas o espectro e o LED, e a interface do Scratch simultaneamente (Fig. 6).

Este procedimento permite ao usuário observar o espectro através do CD, a medida que varia a intensidade de cada pastilha.

Além dessa análise qualitativa, podemos prosseguir e utilizar a imagem

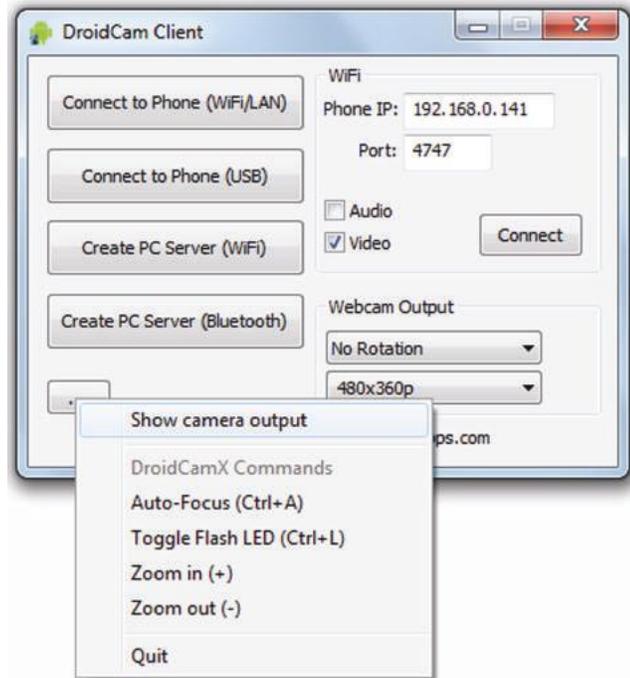


Figura 6. Para conexão wi-fi o aplicativo no celular gera um número de IP que estabelece a conexão com o computador. É possível visualizar as imagens da câmera através da opção “Show camera output”.

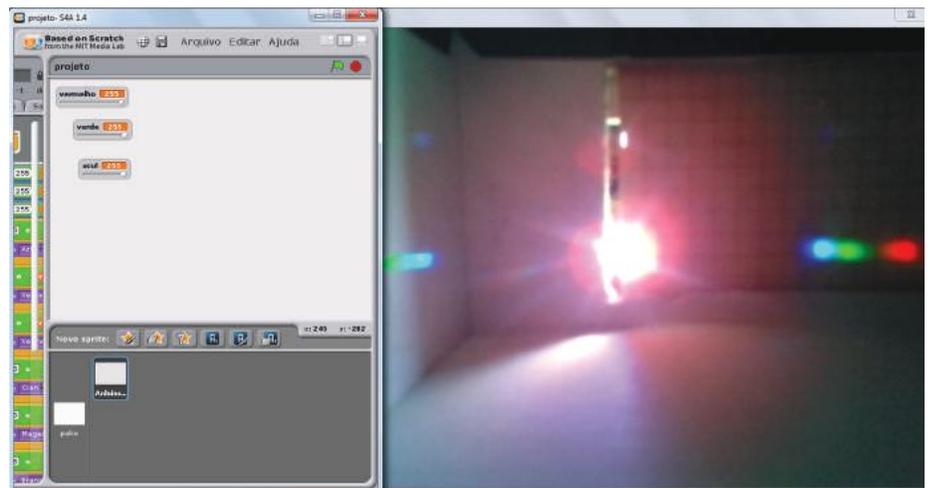


Figura 7. Com o redimensionamento das telas no PC observa o S4A e a câmera do aparelho via Droidcam A foto a condição de máxima intensidade para as três pastilhas obtendo a cor branca na fenda e os espectros de cada LED separadamente a direita da fenda.

visualizada na tela do computador para medir o comprimento de onda de cada componente de cores do LED RGB e de diferentes possibilidades.

Isso pode ser feito através do *software* Tracker Analysis. Para isso basta utilizar a tecla PrintScr do teclado, colar em um editor de imagens, como o *Paint*, e salvá-la.

Em seguida importamos a imagem para o Tracker e daremos início ao processo de calibração com as ferramentas do Tracker. O primeiro passo será calibrar o eixo de medida colocando o bastão de calibração entre um intervalo da escala do papel milimetrado no anteparo. Habilite também o eixo de coordenadas e mova-o até a fenda (Fig. 8).

A coleta de dados será feita com a função “perfil de linha” que deve ser ativada clicando no botão “novo” na barra de ferramentas. Para utilizá-la mantemos pressionada a tecla shift do teclado e arrastamos o alvo, que irá aparecer no lugar da seta do mouse, do início até o final do espectro, como indica a Fig. 8.

É possível perceber uma alteração no gráfico disponível no lado direito da interface. Que mostra em sua componente vertical a intensidade (brilho percebido na imagem) e, na horizontal o desvio da variável em relação a fenda. Entretanto, devemos substituir a variável x do eixo horizontal pelo valor do comprimento de onda.

Sabemos que para a determinação do valor do comprimento de onda utilizando

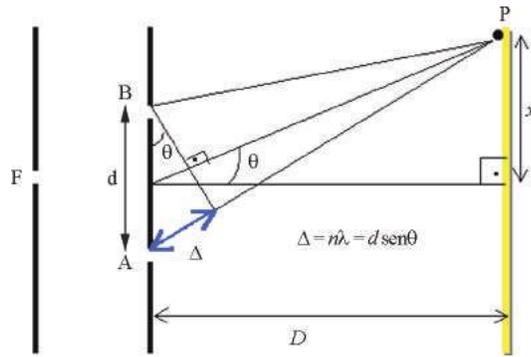


Figura 9. Lei de Young; teremos pontos de interferência construtiva quando $N\lambda = d\text{sen}\theta$, onde λ corresponde ao comprimento de onda da radiação; d é a distância entre os sulcos do CD e N a ordem espectral; no caso, $N = 1$.

um CD como elemento de decomposição, devemos utilizar a relação de Young (Fig. 9)

Assim para obter o valor do comprimento e onda para cada valor de variável horizontal devemos utilizar a relação

$$N\lambda = d\text{sen}\theta, \quad (1)$$

onde λ corresponde ao comprimento de onda da radiação; d é a distância entre os sulcos do CD e N a ordem espectral, no caso $N = 1$.

O valor do seno do ângulo de desvio é dado pela relação

$$\text{sen}\theta = \frac{x}{\sqrt{x^2 + D^2}}. \quad (2)$$

A expressão final que permite obter o valor do comprimento de onda é dada

por

$$\lambda = d \frac{x}{\sqrt{x^2 + D^2}}. \quad (3)$$

Em geral o número de ranhuras por milímetro é de ordem de 600/mm. Como esse valor pode variar é possível obtê-lo para cada CD utilizando uma simples ponteira laser, cujo comprimento de onda informado pelos fabricantes é, em geral, entre 630 e 680 nm.

Portanto antes de se iniciar o processo de medida devemos ter em mãos o valor da distância entre os sulcos do CD previamente determinada.

O *software* Tracker apresenta uma ferramenta muito útil que permite efetuar cálculos para cada uma de suas variáveis. Para que o eixo horizontal possa fornecer diretamente o valor do comprimento de onda devemos usar a expressão da Eq. (3).

Para tanto, clicamos no eixo da variável horizontal e selecionamos a opção “definir”.

Na janela, “construtor de dados”, adicionamos a expressão de Young e os valores conhecidos de D , distancia da fonte do CD a tela e a distância d entre os sulcos do CD (previamente conhecido), segundo mostra a Fig. 10.

Agora basta selecionar o valor de λ definido como coordenada do eixo x no gráfico. Veremos os picos referentes a cada cor do espectro.

O vídeo disponível na Ref.[19] mostra como se pode observar em tempo real a alteração espectral do LED RGB a medida em que as parcelas de cada cor são alteradas.

Resultados

A Tabela 1 mostra os gráficos obtidos, com o *software* Tracker para as cores vermelha e verde separadamente, bem como a cor amarela (vermelho + verde). Pode-se observar que a ocorrência dos pontos de intensidade máxima se dá nos comprimentos

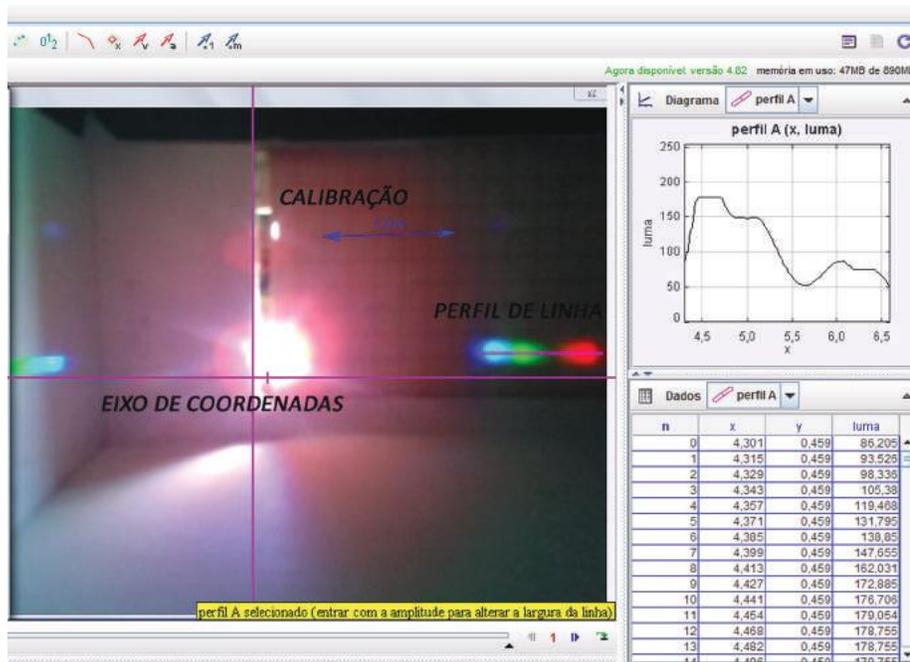


Figura 8. Calibração, posicionamento do eixo e coleta dos dados com a função perfil de linha.

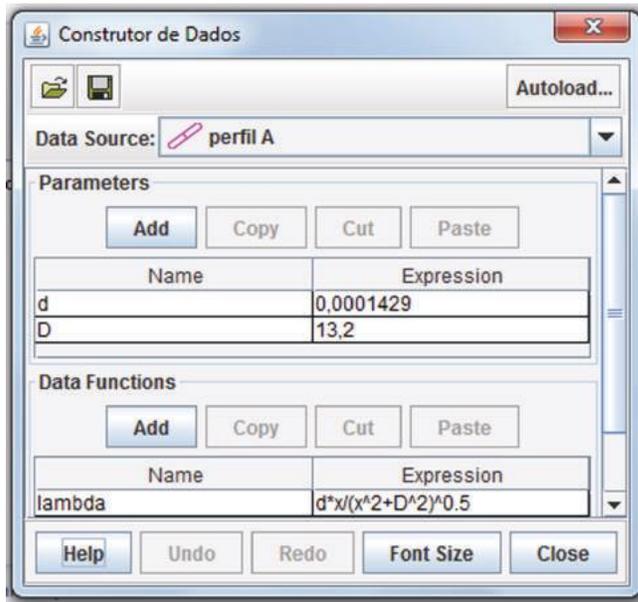


Figura 10. Janela construtor de dados com os parâmetros conhecidos D e d e a expressão da Eq. (3).

mentos de onda 682 nm e 558 nm separadamente; vermelho e verde respectivamente. Quando a superposição ocorre (cor amarela), os valores de intensidade máxima permanecem praticamente com os mesmos comprimentos de onda; dentro da resolução do método proposto. Tal constatação é verificada para outras superposições presentes na Tabela 2.

Considerações finais

A montagem do experimento é bastante rápida e os materiais utilizados são simples e de fácil aquisição. Não é necessário o uso de soldas ou placas de circuito impressos o que torna prático para ser executado mesmo em uma sala de aula comum.

A construção deste experimento por estudantes das séries finais do segundo ciclo do fundamental e Ensino Médio pode trazer pleno entendimento dos conceitos referentes à luz e cor, além de desenvolver

Tabela 1. Componente de cor, espectro correspondente (visualização gráfica) e comprimento de onda do ponto de máxima intensidade, para alguns casos

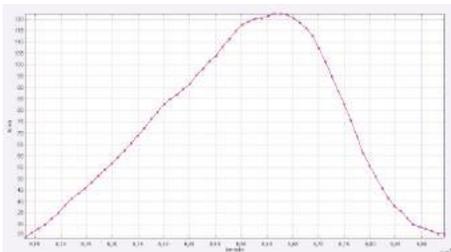
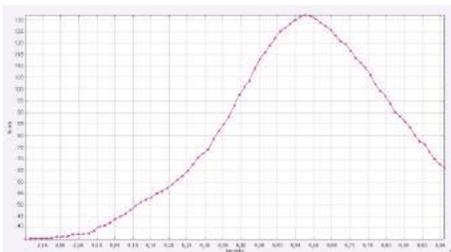
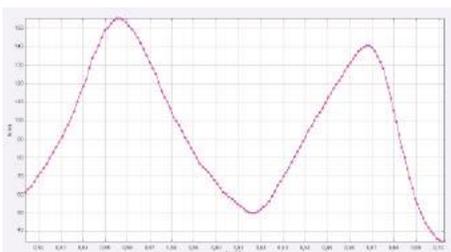
Cor	Espectro obtido no Tracker	Comprimento de onda para o ponto de máxima intensidade (nm)
Vermelho		662
Verde		558
Amarelo		557 e 668

Tabela 2. Tabela dos valores dos comprimentos de onda de intensidade máxima (I_{max}) observados para as cores primárias e secundárias de um LED RGB.

Cor	I_{max} vermelho (nm)	I_{max} verde (nm)	I_{max} azul (nm)
Vermelho	662,6	—	—
Verde	—	557,6	—
Azul	—	—	481
Amarelo	668	557	—
Cian	—	551,9	501,3
Magenta	662,3	—	494,6
Branco	668,6	558,5	508,7
Média	665,38	556,25	496,40

o raciocínio lógico e o interesse pela programação de modo interativo.

Certamente o uso de tecnologias atuais, pode tornar a aula mais motivantes e despertar maior interesse dos estudantes na compreensão de fenômenos correlacionados ao cotidiano do Século XXI.

Um trabalho interessante pode ser realizado em parceria com professores de biologia caracterizando um trabalho multidisciplinar.

Referências

- [1] Tracker Analysis disponível para download em <http://www.cabrillo.edu/~dbrown/tracker/webstart/>, acesso em 3/5/2016, ou em outras bibliotecas digitais como o ComPadre (www.compadre.org).
- [2] Arduino IDE e informações gerais disponível em <http://arduino.cc>, acesso em 3/5/2016.
- [3] (a) Scratch disponível para download em <http://scratch.mit.edu>, acesso em 3/5/2016. (b) Scratch for Arduino (S4A) para download em <http://s4a.cat/>, acesso em 3/5/2016.
- [4] R.B. Renna, R.D.R. Brasil, T.E.B. Cunha, M.M. Beppu e E.G.P. Fonseca (2013) *Introdução ao kit de desenvolvimento Arduino*. Disponível em http://www.telecom.uff.br/pet/petws/downloads/tutoriais/arduino/Tut_Arduino.pdf, acesso em 3/5/2016.
- [5] Tutorial Comando básicos S4A acesso em <https://goo.gl/DOHc0J>, acesso em 24/6/2016.
- [6] *Firmware* para S4A versão 1.6 acesso direto em <http://goo.gl/8HyPRR>, acesso em 24/6/2016.
- [7] Tutorial de instalação *Firmware* na IDE Arduino <https://goo.gl/OvrVKKR>, acesso em 24/6/2016.
- [8] Tutorial para análise espectro com rede de difração com o Tracker <https://goo.gl/mqCvfx>, acesso em 24/6/2016.
- [9] Link acesso direto de instalação da IDE Arduino <https://www.arduino.cc/en/Main/Software>, acesso em 24/6/2016.
- [10] S.C.L. Melchior e J.L.A. Pacca, in: *Ata do IX Encontro de Nacional de Pesquisa em Ensino de Física*, Jaboticatubas, (2004), disponível em http://www.cienciamao.usp.br/dados/epf/_concepcoesdecoreluzarela.trabalho.pdf, acesso em 3/5/2016.
- [11] M.A. Cavalcante e C.R.C. Tavoraro, *Física na Escola* **3**(2), 40 (2002).
- [12] M.A. Cavalcante, C.R.C. Tavoraro e R. Haag, *Física na Escola* **6**(1), 75 (2005).
- [13] M.A. Cavalcante, V. Jardim e A.A.J. Barros, *Caderno Catarinense de Ensino de Física* **16**, 372 (1999).
- [14] M.A. Cavalcante e C.R.C. Tavoraro, *Física Moderna Experimental* (Editora Manole, São Paulo, 2011), 3ª ed.
- [15] Tutorial para a montagem do espectroscópio manual, disponível em vídeo em <http://goo.gl/Oi7Whb>, acesso em 24/6/2016.
- [16] Tutorial para a determinação do número de sulcos/mm do CD, disponível em vídeo em <http://goo.gl/vq0r09>, acesso em 24/6/2016.
- [17] Código Fonte S4A Cores RGB, <https://goo.gl/z1oX60>, acesso em 3/5/2016.
- [18] DroidCam, <http://www.dev47apps.com>, acesso em 3/5/2016.
- [19] Vídeo que mostra a alteração espectral do LED RGB a medida em que as parcelas de cada cor são alteradas: <https://youtu.be/baayi8dvass>, acesso em 24/6/2016.



XXII SNEF

O XXII Simpósio Nacional de Ensino de Física (XXII SNEF) será realizado no Instituto de Física da USP, na cidade de São Carlos, SP, entre os dias 23 e 27 de janeiro de 2017. Desde 1970 os Simpósios Nacionais de Ensino de Física têm se constituído como um espaço privilegiado de troca de experiências, análises e discussões sobre o ensino de Física para diferentes públicos e em diferentes espaços formativos.

Participe!



.....
Daniel Augusto Turolla Vanzella

Instituto de Física de São Carlos,
Universidade de São Paulo, São Carlos,
SP, Brasil

E-mail: vanzella@ifsc.usp.br
.....

Introdução

Em novembro de 1915, Albert Einstein apresentava à comunidade científica o resultado de quase dez anos de esforços em sua busca por uma nova teoria da gravidade. A *teoria da relatividade geral*, como foi chamada, que substituiu, como entendimento fundamental, a velha teoria da gravitação universal de Isaac Newton, revolucionava mais uma vez nosso entendimento acerca de *tempo e espaço*, que, agora, além de serem percepções dependentes de observador (ou seja, *relativas*) de um ente mais fundamental – o *espaço-tempo* –, eram também suscetíveis de serem *distorcidos*

A constatação de que objetos soltos no ar caem no chão é tão corriqueira que o leitor pode se surpreender ao saber que as tentativas de se explicar esse fenômeno levaram a duas das maiores revoluções na história do pensamento humano

pela presença de matéria e energia. Nesse cenário, a mais cotidiana das interações fundamentais conhecidas, a gravidade, ganhou uma interpretação profunda e até mesmo fantástica. Da “criação” do Universo e sua evolução, aos abismos de tempo e espaço escondidos no interior dos buracos negros, a relatividade geral transformou para sempre nossa visão da natureza. E mesmo depois de um século, continua a nos surpreender e a ser a única janela por onde podemos vislumbrar aspectos da natureza que ainda escapam aos maiores e mais avançados laboratórios terrestres.

Das quatro *forças fundamentais* conhecidas na natureza – aquelas que não podem ser explicadas em termos de forças ainda mais elementares –, a *gravidade* é certamente a que primeiro nos demos conta de sua existência. Antes mesmo de descermos das árvores, aprendemos a respeitá-la – sob pena de, não o fazendo, não sobrevivermos ao tombo. A constatação de que objetos soltos no ar caem no chão

é tão corriqueira que o leitor pode se surpreender ao saber que as tentativas de se explicar esse fenômeno levaram a duas das maiores revoluções na história do pensamento humano, unindo céu e terra e tocando no mais antigo de todos os mistérios: a origem do Universo.

Alcançando o céu

Ao que sabemos, a primeira tentativa de se explicar o fenômeno de queda de objetos remonta aos gregos antigos. De acordo com o filósofo grego Aristóteles (384–322 a.C.), um objeto material lançado ao ar retornava ao solo porque o elemento *terra* presente em sua constituição tinha a *tendência natural* de ocupar o centro do

Universo. Como a própria Terra já ocupava esse lugar privilegiado, raciocinava Aristóteles, o melhor que os outros corpos materiais poderiam fazer seria aproximarem-se o máximo possível desse centro; ou seja, voltarem ao chão.

Apesar de insatisfatória para os padrões atuais, essa explicação permaneceu sem contestação no mundo ocidental por quase dois mil anos. Em particular, ela se encaixava naturalmente em duas idéias amplamente aceitas até o final da Idade Média. Uma delas era o *geocentrismo* – a visão de que a Terra ocupava o centro do Universo –, essencial na explicação aristotélica da gravidade. Outra era a rígida dicotomia entre os fenômenos terrestres e os celestes: a causa de um fenômeno tão mundano quanto a queda de um objeto não podia ter nenhuma conexão com fenômenos que se desenrolavam na esfera celeste, como o movimento da Lua e dos planetas, fenômenos estes sob a jurisdição exclusiva de anjos e deuses. Foi o físico inglês Isaac Newton

A teoria da relatividade geral revolucionou nosso entendimento acerca de tempo e espaço. Com ela, a mais cotidiana das interações fundamentais conhecidas, a gravidade, ganhou uma interpretação profunda e até mesmo fantástica. Da “criação” do Universo aos abismos de tempo e espaço escondidos no interior dos buracos negros, a relatividade geral transformou para sempre nossa visão da Natureza. E mesmo depois de um século, continua a nos surpreender e a ser a única janela por onde podemos vislumbrar aspectos da Natureza que ainda escapam aos maiores e mais avançados laboratórios terrestres.

(1642-1727) quem primeiro demonstrou que tal separação era ilusória e que a mesma lei que rege a queda de uma simples maçã aqui na Terra podia também regular o movimento da Lua ao redor da Terra e dos planetas ao redor do Sol. A sua *lei da gravitação universal* - *universal* por se aplicar igualmente a *todos* os objetos, terrestres e celestes - marca a primeira grande unificação ocorrida no âmbito científico, rasgando o véu que mantinha os mistérios do céu protegidos do poder de nossa razão.

Por mais de duzentos anos, a gravitação universal de Newton foi amplamente aplicada, explicando com sucesso o movimento de planetas e cometas, o fenômeno das marés provocado pela atração gravitacional da Lua, a precessão dos equinócios - mudança gradual na direção do eixo de rotação da Terra devido a seu formato ligeiramente achatado e à força gravitacional do Sol -, entre outros. Sua exatidão era (e é) tão grande que, baseado nessa lei e em pequenas irregularidades na órbita do planeta Urano, o matemático francês Urbain Le Verrier (1811-1877) foi capaz de *prever*, em 1846, a existência e a posição de um planeta até então desconhecido que seria responsável por essas irregularidades; Netuno, como foi batizado, foi descoberto dias depois pelo astrônomo alemão Johann Galle (1812-1910) onde Le Verrier havia dito que ele estaria. Plutão seria descoberto mais ou menos da mesma maneira, em 1930, devido a irregularidades na órbita de Netuno. Mas se a teoria da gravitação universal de Newton era tão bem sucedida, por que a necessidade de substituí-la?

Tempo e espaço relativos

Em 1905, os alicerces mais profundos sobre os quais todas as teorias físicas são construídas, nossas noções elementares de *tempo* e *espaço*, foram abalados. O jovem físico alemão Albert Einstein (1879-1955), então um desconhecido funcionário do escritório de patentes de Berna, Suíça, apresentava a solução para um enigma que vinha desafiando físicos teóricos e experimentais havia cerca de duas décadas: a *invariância* da velocidade da luz. Diferentemente da velocidade de objetos comuns, cujo valor também depende do estado de movimento

do observador que faz a aferição - um carro a 40 km/h em relação a um pedestre parado na calçada é visto com uma velocidade de 70 km/h pelo motorista de

um outro carro trafegando em sentido contrário a 30 km/h -, a velocidade da luz parecia ser sempre a mesma, cerca de 300.000 km/s, independente do movimento relativo entre a fonte emissora e o observador - ou seja, no exemplo anterior, ambos, pedestre e motorista do carro trafegando em sentido oposto, mediriam *exatamente* a mesma velocidade para a luz emitida pelo farol do primeiro carro. Einstein percebeu que a única maneira consistente de compreender esse estranho comportamento -

uma velocidade *absoluta* - era aceitar que tanto a percepção de espaço quanto a de tempo deveriam depender do movimento do observador: tempo e espaço seriam conceitos *relativos*. Um exemplo pitoresco comumente utilizado para ilustrar esse fato é o de dois irmãos gêmeos que se separam, um deles saindo em uma viagem a altíssima velocidade e o outro permanecendo em sua vida pacata. Quando o gêmeo viajante retorna de sua veloz empreitada, encontra seu irmão tendo envelhecido *mais* do que ele próprio; ou seja, o tempo passou mais devagar para o viajante do que para quem permaneceu em repouso - efeito tanto mais acentuado quanto mais próximo da velocidade da luz tiver sido o movimento do viajante. Além disso, a distância percorrida na viagem também é fonte de discordância: para o gêmeo que ficou parado, a distância percorrida pelo seu irmão viajante é maior do que a que este último atribui a sua própria viagem. Einstein mostrou que nossas percepções de tempo e espaço devem ser afetadas pelo nosso estado de movimento de modo a compactuar para que um valor especial de velocidade seja absoluto: a velocidade da luz.

Ao revolucionar nosso entendimento sobre tempo e espaço, a *teoria da relatividade*, como ficou conhecida a teoria de Einstein, marcou uma mudança de paradigma na física. Agora, qualquer teoria com pretensões de descrever a natureza em seus aspectos mais fundamentais deveria ser construída sobre essas novas fundações e não sobre as velhas bases newtonianas. Em particular, a teoria da gravitação universal de Newton, assentada sobre os alicerces de tempo absoluto

e espaço euclidiano, por mais bem sucedida que tivesse sido até aquele momento, tinha que ser substituída por uma nova teoria da gravidade que se conformasse com esse novo paradigma.

Encurvando o tempo e o espaço

O próprio Einstein tomou para si essa tarefa de encontrar uma nova teoria para a gravidade. Se fôssemos citar os principais marcos em sua busca, eles seriam três: a formulação do *princípio de equivalência de Einstein*, o surgimento da idéia de *espaço-tempo* e a percepção de que esse espaço-tempo deveria ter uma *geometria curva*.

O princípio de equivalência de Einstein é na verdade uma

reinterpretação de um fato que já era bem conhecido na gravitação newtoniana: o de que todos os objetos caem com a mesma aceleração sob a ação da gravidade, independentemente do quão pesados sejam. Einstein percebeu que esse inocente fato, sozinho, possibilitava interpretar a força da gravidade como sendo uma *força de inércia*, termo usado para designar uma força que deixa de existir quando se adota um ponto de vista especial - o de um referencial inercial. Um exemplo comum de uma força de inércia é a *força centrífuga* que tenta nos jogar para fora de um referencial em movimento circular, como um carrossel girando ou um carro fazendo uma curva. Essa força, que tem efeitos bastante reais para quem está nesse referencial, sendo jogado para fora, simplesmente deixa de existir quando se adota o ponto de vista de alguém parado em terra firme, para quem a simples *inércia* dos objetos - a tendência de manterem seu estado de movimento retilíneo com velocidade constante - é a responsável por "jogá-los" para fora. No caso da gravidade, imagine-se confinado(a) em uma cabine que parece ser um elevador, sem saber como foi parar ali. De repente, um súbito solavanco é seguido de um intenso frio na barriga e uma sensação de total ausência de peso. Seus pés mal tocam o chão e seu celular, tendo escapado de sua mão com o susto, flutua a seu lado. Sua conclusão é tão desesperadora quanto aparentemente inescapável: o elevador encontra-se em queda livre, sendo a sensação de flutuação apenas uma consequência de que tudo - elevador, você, seu celular - cai com a mesma aceleração sob a ação da gravidade. Você apenas lamenta que essa sensação logo terminará com

Para explicar a invariância da velocidade da luz - problema que desafiou os físicos durante duas décadas - Einstein propôs que tanto o espaço quanto o tempo dependiam diretamente do observador. Portanto, esses conceitos eram relativos

O sucesso da gravitação universal de Newton foi construído sobre triunfos como prever irregularidades na órbita de Urano devido a presença de outro corpo próximo. Esse corpo seria descoberto e batizado de Netuno

o elevador se estatelando no fundo do fosso. No entanto, um pensamento otimista lhe vem à mente: estaria *mesmo* o elevador em queda livre? Como ter certeza, apenas baseado no que acontece dentro da cabine? Como discernir a situação de queda livre da possibilidade de que essa cabine na verdade esteja flutuando no espaço sideral longe de qualquer planeta ou corpo capaz de provocar gravidade? Esse é exatamente o teor do princípio de equivalência de Einstein: é impossível discernir, através de experimentos *locais* – dentro da cabine e em um curto intervalo de tempo –, a situação de queda livre em um campo gravitacional da de se estar livre de qualquer força – ou seja, inercial – no espaço sem gravidade. Essa idéia, que o próprio Einstein qualificaria como a mais feliz de sua vida, fornecia uma valiosa conexão entre situações sem gravidade – onde sua teoria da relatividade era aplicável – e situações com gravidade. Ele havia dado o primeiro passo em sua busca.

O segundo passo não foi dado por Einstein mas sim por um ex-professor seu, o matemático alemão Hermann Minkowski (1864-1909). Minkowski percebeu, em 1907, que os efeitos da relatividade poderiam ser melhor compreendidos se tempo e espaço fossem considerados como meras facetas de um ente mais fundamental, um “espaço” físico com quatro dimensões (ou direções independentes) no qual *cada* observador perceberia de maneira *diferente*, dependendo de seu movimento, como essas quatro dimensões se separam nas três espaciais e uma temporal que experimentamos com nossos sentidos. Nascia o conceito de *espaço-tempo*.

Curiosamente, Einstein não percebeu de imediato a profundidade da contribuição de Minkowski. Para ele, a reformulação de sua teoria em termos de espaço-tempo não passava de uma curiosidade matemática, uma “erudição supérflua”. Alguns anos se passariam antes que Einstein desse a devida importância à idéia de Minkowski. Mas quando finalmente o fez, pelos idos de 1912, mostrou mais uma vez sua genialidade ao vislumbrar a possibilidade de descrever a gravidade através de um espaço-tempo que tivesse sua geometria distorcida, curvada pela presença de matéria e energia. O cerne da nova teoria da gravidade estava estabelecido.

Três anos ainda se passariam até que a nova teoria tomasse sua forma final. Em 25 de novembro de 1915, Einstein chega às equações da gravidade que hoje levam seu nome. Na tentativa de encontrar uma teoria da gravidade que fosse consistente com a relatividade de 1905,

Einstein acaba por generalizar esta última. Unindo todas as peças do quebra-cabeças, a *teoria da relatividade geral*, como foi chamada – a teoria de 1905 passou a ser chamada de relatividade restrita ou especial –, aboliu o conceito de *força* gravitacional: agora, uma maçã solta no ar cai em direção ao chão não porque há uma força puxando-a para baixo mas porque a trajetória de queda é a “mais retilínea possível” – *geodésica* – na geometria do espaço-tempo distorcida pela massa da Terra. Do mesmo modo, o Sol não mais exerce uma *força* sobre a Terra e os outros planetas; apenas deforma a geometria à sua volta de modo que os planetas, livres da ação de qualquer força, ao percorrerem as trajetórias “mais retas possíveis” nessa geometria distorcida, acabam descrevendo as órbitas que observamos (veja Fig. 1). Em consonância com o princípio de equivalência de Einstein, que é incorporado da melhor maneira possível pela relatividade geral, os referenciais em queda livre são os verdadeiros referenciais inerciais. Você, leitor(a), sentado(a) em sua cadeira ou em pé lendo estas linhas, está, mesmo parado(a), sendo *acelerado(a)* para cima – ou seja, sendo tirado(a) a todo instante da trajetória que seria inercial – pela única força que atua sobre você no momento: a de contato com a cadeira ou o chão.

O periélio de Mercúrio, o desvio da luz e o GPS

Essa nova maneira de entender a gravidade levou a algumas consequências imediatas. A primeira delas foi a explicação de uma anomalia na órbita do planeta mais próximo ao Sol, Mercúrio. Sabia-se, desde os tempos de Le Verrier, que o ponto de máxima aproximação ao Sol (*periélio*) de Mercúrio mudava ligeiramente, a cada volta, de uma maneira que não podia ser completamente explicada pela gravitação de Newton e os planetas conhecidos. O próprio Le Verrier usara esse fato para

predizer a existência de um planeta desconhecido, ainda mais próximo ao Sol, que foi batizado de Vulcano. Porém, diferentemente do que aconteceu no caso de Urano e Netuno, esse hipotético planeta nunca foi encontrado. Quando Einstein chegou na forma final de sua teoria, ele verificou que, embora para campos gravitacionais fracos ela desse resultados muito parecidos com os da gravitação universal (como não poderia deixar de ser, considerando o sucesso da gravitação de Newton), a diferença entre as duas se acentuava à medida que o campo gravitacional fosse mais intenso. E essa diferença era *exatamente* a necessária para explicar satisfatoriamente a anomalia da órbita de Mercúrio, por este se encontrar mais próximo ao Sol e, portanto, em uma região de campo gravitacional mais intenso. A relatividade geral já nascia com um fato empírico a seu favor.

Mas além de explicar um fato já conhecido, Einstein também extraiu outra consequência imediata de sua teoria: o desvio de raios de luz por campos gravitacionais. Desde que se comprovou que a luz era um tipo de *onda*, em 1801, a idéia de que ela seria afetada pela gravidade de um planeta ou estrela parecia demasiado especulativa para ser levada a sério. Isso porque na gravitação de Newton, vigente na época, *matéria* atrai *matéria*, mas uma onda não carrega matéria consigo ao se propagar. Agora, porém, sendo a gravidade apenas um efeito colateral da curvatura do espaço-tempo, sobre o qual *tudo* se propaga – inclusive a luz –, era inevitável que a trajetória da luz também fosse afetada. Einstein calculou qual seria o desvio de um raio de luz, vindo de uma estrela distante, ao passar rasante ao Sol, o que levaria a uma mudança na posição aparente da estrela quando vista da Terra (Fig. 2). Em 29 de maio de 1919, duas expedições científicas britânicas, uma enviada a Sobral, no Ceará, e outra à Ilha do Príncipe, na costa africana ocidental,

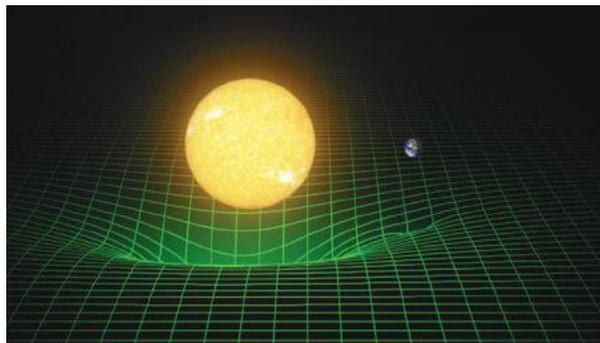


Figura 1. Representação artística da curvatura do espaço(-tempo) devido à presença do Sol e da Terra. (Crédito: T. Pyle/Caltech/MIT/LIGO Lab).

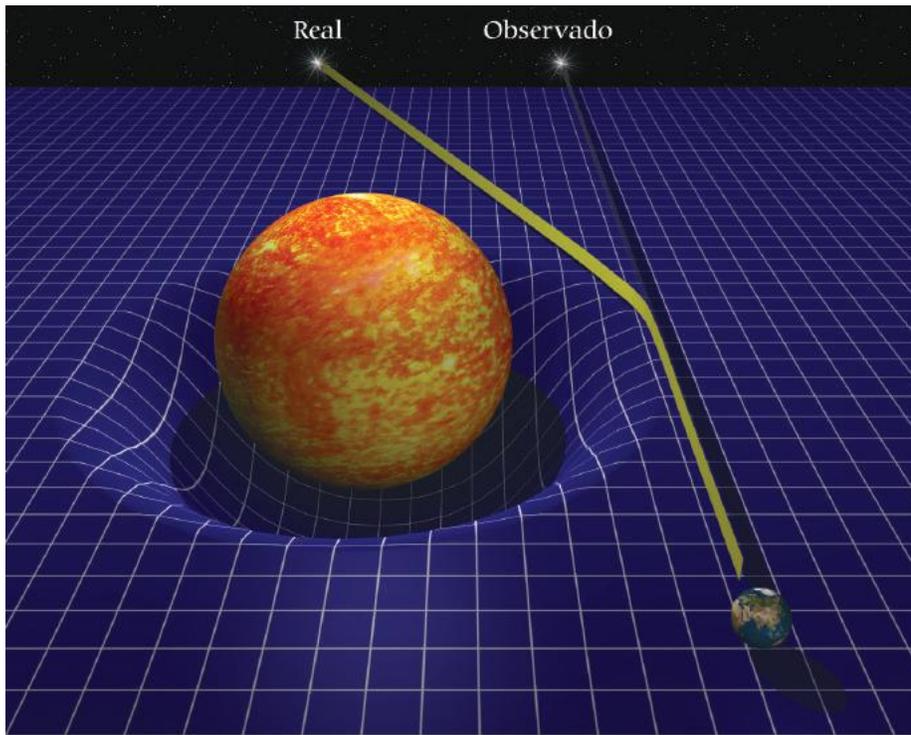


Figura 2. Representação artística da deflexão de um raio de luz passando nas imediações do Sol devido à curvatura por ele produzida. (Crédito: Dave Jarvis, <http://davidjarvis.ca/dave/gallery>).

fotografaram o céu na direção do Sol durante um eclipse total, de modo que as estrelas de fundo pudessem ser vistas. Comparando com registros dessas mesmas estrelas de outra época do ano, quando o Sol não estava entre elas e nós, a mudança na posição aparente dessas estrelas devido à presença do Sol pôde ser medida e a previsão feita por Einstein quase quatro anos antes foi confirmada.

Praticamente da noite para o dia, Einstein se tornou uma celebridade mundial, adquirindo, perante o grande público, uma aura mítica por ter desvendado segredos profundos do espaço e do tempo. Agora, além desses conceitos serem “relativos”, dependentes do estado de movimento do observador, também eram “distorcidos” pela presença de matéria e energia. Por exemplo, de acordo com a relatividade geral, quanto mais intenso o campo gravitacional, mais devagar é o “passar do tempo”. Para campos gravitacionais como o da Terra esse efeito é muito pequeno para ser perceptível em nosso dia-a-dia – o quanto se envelhece *mais rápido* a cada metro que nos afasta-

mos do chão, um centésimo de segundo a cada três milhões de anos, dificilmente convencerá um corretor de imóveis a lhe vender a cobertura de um prédio por um preço mais em conta. Porém, com a tecnologia avançada e sensível que temos hoje, não só somos capazes de medir essa diferença como ela chega a ser um problema em algumas situações. O *Sistema de Posicionamento Global* (GPS), amplamente utilizado hoje em dia por celulares, automóveis, aeronaves, embarcações, entre outros, faz uso do tempo que sinais de rádio emitidos por satélites orbitando a Terra a 20 mil quilômetros de altura, a 14 mil km/h, levam para chegarem no receptor a ser localiza-

No GPS há um tempo de trânsito para a informação ir do equipamento aos satélites distantes 20 mil quilômetros da superfície terrestre. Contudo, devido à distância da Terra e à velocidade dos satélites, o tempo para eles passa 0,000038 segundos mais devagar a cada dia. Sem a correção relativística, a perda de precisão do sistema chegaria a 10 quilômetros ao final de um único dia

do. Com esses *tempos de trânsito* dos sinais obtém-se a distância do receptor até cada um dos satélites utilizados (no mínimo quatro) e, com essas distâncias, determina-se a posição do receptor. Todo o procedimento depende de medidas de tempo com precisão – por isso, cada satélite carrega consigo um relógio atômico. No entanto, devido à altura (e velocidade) em que orbitam, onde o campo gravitacional

da Terra é cerca de dez vezes mais fraco que aqui na superfície, o tempo para eles passa mais rápido a uma taxa de 0,000038 segundos por dia. Quando convertido em distância, esse descompasso causaria, ao final de um único dia de funcionamento, uma perda de precisão de mais de 10 quilômetros, tornando o sistema totalmente inútil. Para evitar isso, essa diferença no fluir do tempo é corrigida de acordo com o predito pela teoria. Portanto, o bom funcionamento do sistema é uma verificação quotidiana da acurácia da relatividade geral.

A tempo para o centenário

Outra consequência que Einstein extraiu de sua teoria já em 1916 foi a de que as deformações no tecido do espaço-tempo poderiam se propagar, como ondulações na superfície de um lago. Nascia o conceito de *ondas gravitacionais*. Como qualquer outra onda, essas também seriam capazes de carregar energia, deformando, mesmo que minimamente, corpos materiais que estivessem em seu caminho – sucessivamente os esticando e espremendo, em direções perpendiculares entre si e perpendiculares à direção de propagação da onda.

Sistemas binários, ou seja, pares de corpos celestes (estrelas, por exemplo) orbitando-se mutuamente, são fontes naturais de ondas gravitacionais (Fig. 3). Como consequência da decorrente perda de energia, as órbitas desses corpos deveriam ficar cada vez menores e suas velocidades cada vez maiores. Embora esse efeito seja muito pequeno para ser percebido na maioria dos casos, em 1974 o físico Russell Hulse (n. 1950) e o astrofísico Joseph Taylor Jr. (n. 1941), ambos norte-americanos, descobriram um sistema binário de estrelas de nêutrons (estrelas muito compactas e densas) que lhes permitiu observar, ao longo dos anos seguintes, os efeitos dessa perda de energia. Embora não fosse possível observar diretamente o portador dessa energia se esvaindo, os efeitos sobre o sistema binário estavam em perfeito acordo com o que



Figura 3. Representação artística das ondas gravitacionais produzidas por um sistema binário. (Crédito: LIGO/T. Pyle).

seria esperado se esse portador fosse ondas gravitacionais emitidas pelo sistema, como previsto pela relatividade geral. Por essa descoberta, Hulse e Taylor receberam o Prêmio Nobel de Física de 1993 e mais uma predição da relatividade geral se confirmava. Ou não?

Embora as observações de Hulse e Taylor fossem um forte indício a favor da existência de ondas gravitacionais, eram, ainda assim, um indício indireto. Era necessário detectar algumas dessas ondas para se ter o veredito final. Essa tarefa, no entanto, não é fácil. Tipicamente, ondas gravitacionais que chegam na Terra produzem distensões e compressões que, mesmo para a própria Terra, não passam muito do tamanho de um núcleo atômico (que já é cerca de 100 mil vezes menor que o átomo). E esse efeito é proporcional ao tamanho do corpo; ou seja, ainda menor para qualquer aparelho de medida construído na Terra.

Em 1999 é inaugurado, nos Estados Unidos, o *Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory* (LIGO), constituído de dois interferômetros (dispositivo que detecta mínimas mudanças de comprimento usando técnicas de interferência de luz), construídos nos estados de Washington e Louisiana (Fig. 4). Cada um desses interferômetros possui dois “braços” perpendiculares de 4 quilômetros cada, com espelhos em suas extremidades. A idéia básica é que a passagem de uma onda gravitacional pela Terra poderia alterar de maneira diferente o comprimento de cada um dos braços, de modo que um raio de luz (laser, no caso) percorrendo cada um desses braços o faria em tempos diferentes. Essa diferença de tempo acarretaria uma mudança no padrão de interferência entre raios percorrendo os diferentes braços, o que poderia ser detectado. Porém, de 1999



Figura 4. Foto aérea do laboratório LIGO localizado em Livingston, no estado da Louisiana, EUA.

a 2010, quando o experimento foi interrompido para se fazer melhorias técnicas, nada foi detectado.

Depois de completadas as melhorias do agora *advanced LIGO* (aLIGO), projetado para ser mais de dez vezes mais sensível que sua versão anterior, o primeiro período oficial de observações se iniciaria em meados de setembro de 2015. Alguns dias antes, porém, no dia 14 de setembro, durante testes em que os interferômetros estavam funcionando plenamente, uma surpresa: a primeira detecção de

ondas gravitacionais da história da humanidade! E por um desses caprichos, bem a tempo de celebrar o centenário da teoria que previu sua existência (embora a divulgação da detecção só tenha ocorrido meses depois, em 11 de fevereiro de 2016).

De setembro de 2015 a janeiro de 2016 mais dados foram colhidos pelos interferômetros e não faltam rumores de que mais detecções foram feitas e logo serão tornadas públicas. Vivemos um momento histórico no qual uma nova janela de observação para o Universo foi aberta.

Uma lente para o lado escuro do universo

A relatividade geral mudou dramaticamente a maneira como vemos o universo. Logo em 1917, Einstein percebeu que sua teoria não favorecia a idéia de que o universo fosse *estático*: ele deveria estar se expandindo ou se contraindo, de modo que no passado ele deveria ter sido bem diferente do que é hoje, possivelmente tendo até tido um *início*. Era a primeira vez que essa questão, que sempre instigou a mente humana,

Ondas gravitacionais incidentes na Terra provocam no planeta distensões e compressões da ordem de um núcleo atômico. Sua detecção, em 2015, chegou bem a tempo de coroar a acuidade da teoria geral da relatividade em seu centésimo aniversário.

podia ser abordada de uma maneira científica. Mas mesmo Einstein, com sua genialidade, não era imune aos preconceitos de sua época e ele resolveu modificar sua teoria – introduzindo o que ficou conhecido como *constante cosmológica* – de modo que ela se conformasse com um universo estático e

eterno. Quando em 1929 o astrônomo americano Edwin Hubble (1889-1953) publicou o resultado de suas observações mostrando que as galáxias estavam se afastando umas das outras – ou seja, o universo estava de fato

em expansão –, Einstein abandonou a constante cosmológica, chamando-a de o maior erro de sua vida. Hoje sabemos, graças a dados coletados por telescópios terrestres e espaciais, que não apenas nosso universo está se expandindo desde há cerca de 13,8 bilhões de anos mas que, surpreendentemente, nos últimos 6 bilhões de anos o está fazendo de maneira cada vez mais rápida. Interpretado à luz da relatividade geral, esse fato significa que cerca de 70% do conteúdo de energia do universo está em uma forma exótica, furtiva, diferente de qualquer coisa que já detectamos em nossos mais avançados laboratórios de física de partículas. Não conseguimos “vê-la” mas sua existência é denunciada pelo seu efeito gravitacional sobre a expansão do universo – por isso, mesmo sem se conhecer sua identidade, foi batizada de *energia escura*. O mesmo acontece com outros 25% do conteúdo de energia do universo: através de seus efeitos gravitacionais, curvando raios de luz de galáxias distantes e influenciando a expansão do universo, sabemos que existe cinco vezes mais matéria – de um tipo ainda desconhecido, denominada *matéria escura* – do que podemos “ver” diretamente. Enquanto nossos mais avançados aceleradores e detectores de partículas, como o *Large Hadron Collider* (LHC), sob a fronteira franco-suíça, buscam incansavelmente, mas ainda sem sucesso confirmado, por indícios de partículas além das que são previstas pelo *modelo padrão das partículas elementares* – que dão conta de apenas 5% do que existe no universo –, a relatividade geral abre uma janela para os restantes 95% dos constituintes da natureza.

Buracos negros e o início do universo

Apesar de tudo que a relatividade geral possibilitou que aprendêssemos sobre o universo em grandes escalas, é no con-

texto estelar que surge sua consequência mais fantástica. O ciclo de vida de uma estrela pode ser bastante complicado e tempestuoso, dependendo de sua massa, mas é certo que, em algum momento, as reações de fusão nuclear que ocorrem em seu interior, que geram calor e pressão suficientes para sustentar sua própria gravidade, cessam ou se tornam ineficientes. Quando chega esse momento para estrelas que têm cerca de 10 vezes ou mais massa que o Sol, o núcleo da estrela colapsa sob sua própria gravidade, gerando ondas de choque que ejetam suas camadas mais externas em uma grande explosão – uma *supernova*. Se a massa do objeto remanescente desse processo de “morte estelar” for maior do que cerca de 3 massas solares, então *nada* é capaz de impedir que toda essa matéria colapse indefinidamente até se concentrar em uma região de volume efetivamente nulo! A curvatura provocada por essa *singularidade* no espaço-tempo é tão grande que qualquer coisa que se aproxime muito, inclusive a luz, é inevitavelmente tragada em sua direção. Essa região em torno da singularidade de onde nem mesmo a luz consegue escapar é chamada de *buraco negro* e a fronteira imaterial que a delimita é chamada de *horizonte de eventos*.

Não podemos literalmente ver um buraco negro – já que *nada* escapa de seu interior – mas sua presença pode ser denunciada pelo efeito que provoca na matéria e na luz que se encontra ou passe

por suas imediações. É desse modo que sabemos, por exemplo, que um forte candidato a buraco negro, com cerca de 4,1 milhões de massas solares, encontra-se no centro de nossa própria galáxia. E longe de ser um caso isolado, hoje acredita-se que a maioria das galáxias têm um buraco negro gigante em seu centro, alguns com até bilhões de massas solares. Em uma escala bem mais modesta, buracos negros de algumas massas solares podem ser identificados pela emissão de raios-X da matéria sendo engolida, antes de cruzar o horizonte de eventos, “canibalizada”, por exemplo, de alguma estrela vizinha muito próxima – como no sistema chamado Cygnus X-1 (Fig. 5). Embora o próprio Einstein aparentemente nunca tenha aceitado a existência desses objetos exóticos, frutos de sua própria teoria, hoje em dia é inconcebível acomodar todas as observações astronômicas sem fazer uso da existência de buracos negros.

Mas para os interessados em questões fundamentais da natureza, os buracos negros têm uma importância maior do que a de apenas explicar dados observacionais. Entender as singularidades escondidas em seu interior é uma questão que tem frustrado gerações. No escopo da relatividade geral, as singularidades são como “bordas” do espaço-tempo, o “fim da linha” para quem ou o que a elas se dirigirem. No entanto, acredita-se que uma teoria da gravidade “melhor” que a relatividade geral, em que os princípios da

mecânica quântica sejam levados em conta de maneira totalmente consistente – uma teoria de “gravidade quântica” –, seja capaz de revelar a verdadeira estrutura das singularidades. Embora estejamos protegidos de qualquer consequência dessas singularidades nos mantendo do lado de fora do horizonte de eventos, acredita-se que há cerca de 13,8 bilhões de anos uma singularidade tenha sido o ponto de partida para a subsequente expansão do universo. Portanto, guardada no interior dos buracos negros pode estar a chave para o mais antigo dos mistérios: a origem do universo.

À espera de um novo paradigma

Cem anos depois de sua formulação, a relatividade geral resiste como sendo a última teoria *clássica* ainda utilizada, com sucesso inigualado, para descrever uma interação fundamental. Assim como aconteceu com a gravitação universal de Newton com o advento da relatividade restrita, acreditamos que a relatividade geral deva ser substituída por uma versão que se adeque ao paradigma introduzido pela física quântica. Mas a busca por essa teoria de “gravidade quântica” – o que quer que isso seja –, que é quase tão antiga quanto a própria relatividade geral, tem frustrado os mais brilhantes físicos teóricos de cada geração – inclusive o próprio Einstein. Novamente a exemplo da gravitação newtoniana e da relatividade restrita, em que ambos tiveram que ceder para se chegar a uma teoria mais profunda, talvez não baste tentar construir uma teoria da gravidade sobre os princípios quânticos como os conhecemos; talvez seja necessária uma reformulação de ambos os lados. Na carência de dados experimentais para indicar o caminho, não será uma grande surpresa se a relatividade geral completar seu segundo centenário tão em forma quanto completa o seu primeiro. Certamente, ela continuará sendo uma valiosa ferramenta na exploração do universo.

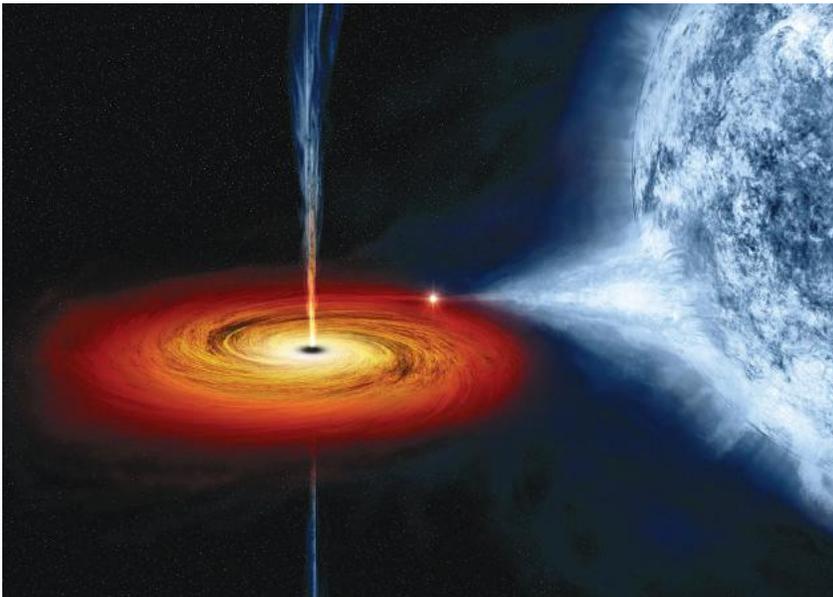


Figura 5. Representação artística de Cygnus X-1, um buraco negro com cerca de 14,8 massas solares que gira em torno de seu próprio eixo cerca de 800 vezes por segundo, a cerca de 6 mil anos-luz da Terra. O buraco negro atrai matéria de sua companheira estelar, formando um disco que emite raios-X – detectados por satélites e observatórios construídos para este fim –, antes de finalmente ser engolida ou ejetada ao longo do eixo de rotação do buraco. (Crédito: NASA/CXC).

Sugestão de leitura

- Abraham Pais, *Sutil é o Senhor* (Nova Fronteira, Rio de Janeiro, 1995).
- Bertrand Russell, *ABC da Relatividade* (Zahar, Rio de Janeiro, 2005).
- Simon Singh, *Big Bang* (Record, Rio de Janeiro, 2006).
- Kip Thorne, *Black Holes and Time Warps* (W.W. Norton & Company, New York, 1994).
- George Matsas e Daniel Vanzella, *Buracos Negros: Rompendo os Limites da Ficção* (Vieira & Lent, Rio de Janeiro, 2008).

Conversando com Einstein: as origens da Relatividade Geral e a constante cosmológica - Parte 1



.....
Alexandre Medeiros

Departamento de Física, Universidade
Federal Rural de Pernambuco, Recife,
PE, Brasil

E-mail: alexmed.df@gmail.com
.....

Recebo uma mensagem do Nelson Studart, já tarde da noite, me pedindo para que eu faça uma daquelas minhas entrevistas construídas, desta vez com o Einstein, sobre a Relatividade Geral e as Ondas Gravitacionais recentemente detectadas em setembro de 2015. Mas, logo agora eu queria dar um passeio até a praia de Galinhos, no Rio Grande do Norte. Assim, eu vou dormir pensando na tal entrevista e sonhando com a Praia de Galinhos.

De repente percebo como o Sol já está brilhando no horizonte, lá na praia, e me sento em um barzinho de onde posso ver, ao longe, o farol vermelho e branco de Galinhos. Meus amigos físicos foram pedir uma água de coco ao garçom, lá no balcão. Neste momento, um senhor de cabelos brancos se aproxima de mim e me pergunta onde se pode conseguir uma daquelas charretes de burro que levam até ao farol. Eu, ainda preocupado com a escrita da tal entrevista respondo reflexivamente, olhando para dentro do bar e sem olhar direito para o seu rosto.

- É lá no porto; junto ao rio! Se quiser pode sentar aqui que daqui a pouco passa uma delas.

- Obrigado! Vou aceitar.

Eu me viro e tomo um susto. O sujeito é a cara do Einstein. O mesmo que eu entrevistei alguns anos atrás em Campina Grande para um artigo na FnE.

- Não pode ser! Que sorte, a minha! É o senhor, mesmo?

- Claro! Não está me vendo?

- É que o senhor sumiu de repente, sem dar uma palavra, naquele dia lá em Campina Grande.

- Pois, sou eu, mesmo! Gostei do forró lá de Campina Grande e resolvi vir conhecer também essa praia quase deserta de Galinhos sobre a qual me falaram lá na Paraíba.

- Nem sei o que lhe dizer; Herr Einstein. O senhor apareceu na hora certa.

Eu preciso escrever uma entrevista com o senhor sobre as ONDAS GRAVITACIONAIS.

- Bem! Essa é uma longa história. Por onde quer que eu comece?

- Pelo início, se for possível.

Neste momento chegam os meus amigos e um deles, o físico francês Charles Robert, toma um susto ao ver o velho Albert sentado ao meu lado e deixa o seu copo cair ao chão. Os outros também ficam mudos de surpresa e espanto ao verem o velhinho ali.

Para quebrar o gelo, eu os apresento ao velho Albert.

- Calma; amigos! Não me perguntem como isso pode ser possível. Apenas curtam a presença aqui do nosso amigo Herr Einstein e relaxem. Deixem-me apresentá-los a ele. Herr Einstein, estes são meus amigos que certamente vão querer me ajudar nessa conversa com o senhor sobre as Ondas Gravitacionais. Este que deixou cair o copo é o físico experimental francês Charles Robert Des Saints, nascido na pequena cidade de Sable Blanc. Ele conhece bem a sua biografia e a sua obra e até já escreveu um livro sobre o senhor.

- Muito prazer, Monsieu Des Saints. Foi o senhor quem escreveu aquele livro sobre minha visão da Educação?

Charles Robert, ainda espantado; responde de modo entrecortado ao velho Albert:

- Não, Herr Einstein! Eu escrevi um livro criticando alguns detratores que o acusavam de plágio. Quem escreveu sobre sua visão de Educação foi justamente o Alexandre.

- Herr Einstein, digo eu tomando novamente a palavra; este aqui é o meu amigo, o físico camaronês, Dr. Cyrano Bahr Etto. Ele é um especialista em cristais; mas há muito tempo vem trabalhando com o ensino da Física. E esta é sua estudante, a senhora Calina que ensina Física em escolas em Cabaceiras, no

Apresentamos neste texto, de uma forma leve e introdutória, a complexa questão das origens históricas da Teoria da Relatividade Geral de um modo pretensamente divertido como uma entrevista fictícia com Albert Einstein. Neste contexto discutimos o conceito da constante cosmológica e preparamos o terreno para que em um artigo seguinte, a ser publicado na próxima edição da revista FnE como uma sequência desta conversa construída; possamos enveredar pela discussão do tema das ondas gravitacionais, desde a sua histórica concepção até a sua recente detecção observacional.

sertão da Paraíba.

Herr Einstein cumprimenta os dois com um sorriso educado.

- Prazer, Monsieur Bahr Etto. Enchanté, madame Calina.

- E estes outros dois são meus amigos, o geofísico holandês Gil Van Borbha. Ele trabalha com Plasmas e é um estudioso da Ionosfera; além de ser um apaixonado por foguetes e pela História da Física. Ele diz que é descendente do Conde Mauricio de Nassau, aquele mesmo que passou em Olinda e morou em Recife no século XVII. E este é o físico cubano Carlos Reys que trabalhou com Espectroscopia Raman e que há muito tempo trabalha também com o Ensino da Física.

- Muito prazer, Mr. Van Borbha; muito prazer Dom Carlos.

Vejo que os amigos ainda estão meio sem jeito com aquela surpresa e os convidado a se sentarem para conversarmos com o velho Albert.

- Vejam, amigos, eu havia dito a Herr Einstein que preciso fazer uma entrevista com ele sobre as Ondas Gravitacionais e vocês poderiam me ajudar nessa conversa.

Claro! Dizem todos quase ao mesmo tempo.

- Quem quer começar?

Calina toma logo a palavra e pergunta:

- Como nasceu essa ideia de Ondas Gravitacionais, Herr Einstein? O que é que ela tem a ver com a Relatividade? Ou não tem nada a ver?

O velho Albert sorri amistosamente e se dirige a Calina:

- Como a senhora sabe; madame Calina.

- Pode me chamar de Cacá.

- Pois bem, madame Cacá; você deve saber que eu já havia escrito a minha Teoria da Relatividade Restrita desde 1905. Naquela época, em 1905, eu estava preocupado com questões ligadas à simultaneidade de eventos e ao conflito entre a Mecânica Clássica e o Eletromagnetismo. Aquela coisa de que as Equações do Eletromagnetismo mudavam os seus formatos matemáticos mediante as clássicas Transformações de Coordenadas de Galileu.

- Isso nós sabemos, meu caro senhor Albert; diz o Gil Van Borbha. As equações do Eletromagnetismo não pareciam ser covariantes mediante aquelas transformações e sim mediante as recentes transformações de Lorentz; mas aquelas transformações de Lorentz estavam ligadas à sua recente Teoria do Elétron.

- Isso, Mr. Van Bohrba! Eu apresentei uma nova e revolucionária heurística para chegar às mesmas transformações de coordenadas do Lorentz. Construí uma

Teoria de Princípios e baseado neles eu não apenas obtive as tais transformações do Lorentz; mas, sobretudo mostrei que elas faziam parte de uma nova visão de mundo que revolucionava os nossos conceitos intuitivos de TEMPO e ESPAÇO.

Preocupado com o rumo da nossa conversa, que temo ficar muito longo, começando pela Relatividade Restrita, eu interrompo a mesma; tentando redirecioná-la.

- Eu gostaria muito de conversar sobre isso com o senhor, meu caro Herr Einstein; afinal o nascimento da Teoria da Relatividade Restrita é um tema interessantíssimo; mas, no momento, a minha preocupação é com as Ondas Gravitacionais que são uma coisa bem posterior na obra do Einstein.

O velho Albert parece não apreciar muito a minha súbita interrupção e me corrige com certa ironia:

- Na minha obra, você quer dizer.

Eu dou um sorriso e topo entrar na brincadeira do velhinho.

- OK! Na sua Teoria, Herr Einstein! Então, por favor, conte como isso aconteceu.

- Pois, bem! A Relatividade Restrita, como eu estava falando, apesar de ter sido realmente revolucionária e de haver alterado os nossos conceitos clássicos de tempo e de espaço, ainda tinha uma clara limitação. Ela não considerava a aceleração dos corpos. E para dar conta disso; para ampliar a Relatividade e incorporar nela a aceleração, eu passei aproximadamente dez longos anos, até o final de 1915.

- Nós sabemos disso, Herr Einstein; diz o Charles Robert, também tentando abreviar o relato inicial! No final de 1915 o senhor finalmente apresentou ao mundo a sua Teoria da Relatividade Geral que era, na verdade, uma nova Gravitação ou uma Geometria do Espaço-Tempo.

- Isso! Foi isso mesmo que eu fiz, Monsieur Des Saints.

Eu dou um sorriso e continuo dando corda para que o velhinho chegue logo ao ponto:

- OK, Herr Einstein! Mas, e as Ondas Gravitacionais? Como e quando elas entraram em cena?

Nosso amigo cubano Carlos Reys se apressa e responde antes que o velho Albert possa dizer alguma coisa e mudar o rumo de sua prosa:

- O Einstein publicou a sua Teoria da Relatividade Geral em 1915 e já no ano seguinte de 1916 fez a previsão da existência das Ondas Gravitacionais. Agora essa previsão completa 100 anos.

Albert dá um sorriso de aprovação e diz:

- Isso mesmo, Dom Carlos!

Meu amigo camaronês, Cyrano Bahr Etto entra em cena tentando organizar a narrativa do velho Albert.

- No que diz respeito ao problema do ensino desse assunto, se nós pensarmos em uma abordagem histórica, pelo que eu entendi; acho que seria interessante se separar um histórico de como a ideia das Ondas Gravitacionais surgiu e também algo a ser dito sobre o seu significado e finalmente falar também sobre a possibilidade de uma detecção das mesmas, que é o que se conseguiu recentemente. Seria possível tomar um caminho assim, Herr Einstein?

- Pois, não Monsieur Bahr Etto! Façamos isso! Vamos seguir sua sugestão. Primeiro, eu vou falar de como surgiu a ideia das Ondas Gravitacionais, no contexto de minha Teoria da Relatividade Geral para só depois falarmos em suas consequências teóricas e nas tentativas de testar a referida teoria. Isso nos conduzirá, ao final, a discutir esse experimento recente realizado em setembro de 2015 pela equipe do LIGO e anunciado, com alarde, apenas em fevereiro de 2016.

- Obrigado, Herr Einstein; por favor, prossiga sua narrativa!

- Bem, como disse Dom Carlos; no final de 1915 eu publiquei minha Teoria da Relatividade Geral e com ela expliquei a Gravidade como sendo uma consequência da curvatura do espaço-tempo pela massa e energia. Assim, eu pude reconstruir a antiga ideia de Gravidade e resolver alguns problemas que a Teoria Clássica da Gravitação de Newton não conseguia resolver. Desde então, ela passou em dezenas de testes observacionais e experimentais aos quais foi submetida.

- Mas, e as Ondas Gravitacionais; como é que elas apareceram nesse contexto? Arremata Calina.

- Bem, madame Cacá; é que a Teoria estabelecia que objetos maciços curvam o tecido do espaço-tempo; e estas curvaturas se propagam como uma forma de vibrações gravitacionais como se fossem verdadeiras ondas ou uma nova espécie de radiação.

- Mas, como elas são geradas?

- Simplificadamente, imagine uma analogia com o caso eletromagnético que é mais conhecido. Note que, como eu disse, a atração gravitacional observada entre duas massas é concebida na Relatividade Geral como sendo o resultado da curvatura do espaço-tempo por estas mesmas massas. No caso eletromagnético, as cargas aceleradas emitem uma radiação eletromagnética que se propaga na forma de uma onda eletromagnética;

na Relatividade Geral, por analogia, as oscilações das massas criam ondas gravitacionais que se propagam à velocidade da luz no espaço-tempo de Minkowsky. Mas, a coisa, na verdade, não é assim tão simples como possa parecer, pois enquanto no caso eletromagnético há um momento de dipolo; na Relatividade Geral há a necessidade de um momento de quadrupolo mais complexo.

- O que isso significa em termos mais simples, Herr Einstein?

- Significa que enquanto as fontes das ondas eletromagnéticas são vistas classicamente como dipolos oscilantes, como em uma antena; as fontes das ondas gravitacionais são objetos mais complexos, como halteres em rotação, o que na prática pode ser concebido como, por exemplo, um sistema de estrelas binárias ou como dois buracos negros espiralando em torno de um centro de massa comum, um em direção ao outro.

Nosso amigo cubano Carlos Reys, entra mais uma vez na conversa preocupado com a questão pedagógica de se explicar algo assim tão complexo:

- O que me preocupa, Herr Einstein é como levar isso para a sala de aula. Como fazer a “transposição didática” dessa sua bela metáfora de forma que os nossos alunos possam compreender.

- Realmente, não é algo simples, Dom Carlos; principalmente se o estudante não percebe a razão de ser do momento quadrupolar. Mas, de toda forma, a ideia de que na Teoria da Relatividade Geral a gravidade é tratada como sendo um fenômeno resultante da curvatura do espaço-tempo me parece algo mais palpável. E a ideia de que essa mesma curvatura é causada pela presença da massa também me parece mais palatável do que se falar logo no momento quadrupolar associado à massa. Geralmente, quanto mais massa está contida em um dado volume de espaço, maior será a curvatura do espaço-tempo no limite do seu volume. Assim, quando os objetos com grande massa se movimentam aceleradamente no espaço-tempo, as curvaturas introduzidas pelos mesmos mudam de modo a refletirem as localizações alteradas desses mesmos objetos. De certo modo, objetos acelerando geram mudanças nessa curvatura, que se propagam com a velocidade da luz na forma de uma onda. São esses fenômenos de propagação o que denominamos como ondas gravitacionais.

- Eu entendo a questão pedagógica que o Carlos levanta; Herr Einstein – diz o nosso amigo holandês, o Van Borbha – como dividida em dois pontos: um deles é a dificuldade de se compreender o que o

senhor quer dizer quando fala em “curvatura do espaço-tempo”; ou mesmo simplificando a linguagem utilizada em “curvatura do espaço”. Porque o estudante não percebe facilmente o espaço como sendo algo que se possa curvar, como se ele fosse, por exemplo, uma folha de papel. Esse é um primeiro ponto. O espaço, na visão tradicional, penso eu, é visto mais de forma cartesiana, como sendo um mero repositório inalterável de coisas. Algo como um baú onde se joga as coisas lá dentro. E o segundo ponto me parece ser a dificuldade de se compreender a necessidade, mais técnica, da introdução do momento de quadrupolo. Talvez, essa segunda dificuldade pudesse ser suavizada se a narrativa do conteúdo fosse feita em uma perspectiva histórica que mostrasse a necessidade de aparecimento do mesmo. O que o senhor acha disso?

O velho Albert fica alguns instantes em silêncio refletindo e finalmente responde, lentamente, à colocação de Van Borbha:

- Sua observação é muito pertinente, meu caro Mr. Van Borbha. No tocante à questão do quadrupolo é realmente necessário se entrar em alguns detalhes matemáticos mínimos para se perceber a sua necessidade; mas, eu concordo que sua compreensão ficaria suavizada se esta necessidade fosse colocada em uma perspectiva histórica e também metafórica como tentei fazer momentos atrás. Entretanto, foram vocês mesmo que me pediram para apressar o passo para que eu chegasse logo nas Ondas Gravitacionais. Talvez nós possamos retroceder um pouco e contar como eu desenvolvi a Teoria da Relatividade Geral e de onde nasceu essa necessidade. Risos...

Ele diz isso e olha para mim com um fino olhar irônico e eu me sinto envergonhado de ter tentado, inadvertidamente, apressar a sua narrativa histórica. Ele vai ter de contar um pouco mais sobre como essa coisa surgiu e eu vou tentar explicar isso ao Nelson se a entrevista ficar muito longa. De todo modo, o velho Albert continua sua resposta ao Van Borbha:

- No tocante à sua outra observação de não ser algo trivial se compreender o significado da expressão “curvar o espaço”, eu também estou de pleno acordo. Vamos tentar refletir logo sobre uma possível “transposição didática”, para usar essa feliz expressão de origem francesa utilizada por Dom Carlos Reys.

Nosso amigo cubano dá um sorriso de felicidade ao ser mencionado desse modo tão gentil pelo velho Albert, enquanto este prossegue a sua explicação.

- Na Física Newtoniana, você imagina

um corpo, uma estrela, por exemplo, e diz que ela exerce diretamente uma força sobre outro corpo celeste; um planeta em movimento, por exemplo. E a força exercida pela dita estrela faz com que a trajetória deste corpo se curve. Uma forma equivalente de você descrever a situação, porém mais geral e que se aplica até mesmo para a luz, é afirmar que a estrela curva o espaço. E ela curva o mesmo mais acentuadamente quanto maior for a sua massa e mais perto o corpo estiver dela.

Calina parece não se satisfazer com a explicação dada e insiste nesse mesmo ponto.

- Mas, Herr Einstein; curva como se a gente não consegue ver o espaço se curvar? Como a gente sabe que ele está curvo?

Os olhos do velho Albert brilham ao ouvir aquela observação.

- Ótima observação! Parabéns! Como a gente sabe que ele está curvo? Veja! Se o espaço que você considera é uma folha de papel; você poderia imaginar uma formiga se movimentando na mesma em linha reta; certo?

- Certo!

- Se, agora, você curvasse, no sentido clássico que você está acostumada, de ver a folha mudar de forma, de tal modo que a trajetória da formiga, agora, se tornasse uma curva, o que estaria diferente?

- A folha agora estaria visivelmente curva.

- Certo! Ela estaria visivelmente curva; mas tente descrever essa curvatura da folha de papel que você está vendo sem falar nessa visão. O que teria mudado na folha, que é o seu espaço, quando você a dobrou?

-Como, assim?

- Pense no que ocorreu com a trajetória da formiga.

- Ficou curva também. O que era uma reta virou uma curva.

- Isso! – Diz o velho Albert sorrindo, embora, no caso específico da folha de papel seja possível curvar a mesma e a formiga ainda continuar a se mover sobre a aresta da possível dobra que tivéssemos introduzido na mesma e que poderia ainda poder ser uma reta; mas, imagine, agora, que você transformasse sua folha em uma esfera.

- E pode?

- Ótima observação, madame Cacá! Imagine que sua folha é feita de borracha ou de massa plástica. Ela pode esticar; pode dobrar; ela é perfeitamente deformável. Pense, agora, na esfera que era uma folha plana. Agora faça a sua formiga caminhar em linha reta.

- Em cima da esfera, Herr Einstein? Não pode!

- Isso! Muito bem! Não pode mais! Mas, antes da deformação introduzida podia. Então quer dizer que ao “curvar o seu espaço” deste modo você introduziu neste seu espaço uma proibição ou uma restrição de certo tipo de trajetória. Agora, ele não pode mais conter retas. Você introduziu nele uma restrição de caminho; causou uma modificação típica das que se consegue fazer em folhas de borracha e que se chama matematicamente de uma modificação topológica e não apenas puramente geométrica em seu sentido clássico.

- Puxa! Que legal! Saquei!

- Sacou o que, madame Cacá? – Diz o velho Albert sorrindo.

- Saquei que a gente pode descrever a curvatura da folha de borracha sem falar na sua forma visual; mas se referindo à reta que não se pode mais traçar na mesma; que agora está proibida por essa tal de modificação topológica.

- Isso! E se você tem um feixe de luz se propagando no espaço, como é a trajetória dele?

- Em linha reta, claro!

- Você está fazendo um pressuposto sobre o espaço sem sentir. Qual?

- Eu estou imaginando apenas que a luz se move sempre em linha reta e isso não se pode mudar.

- Será que não? Se um raio de luz vindo de uma estrela distante chegar até aos nossos olhos e nós percebermos a configuração da referida estrela em relação a outras estrelas no Céu e em determinado momento a posição de nosso planeta for tal que a luz proveniente da mesma estrela passe perto de outra estrela; será que isso mudaria a posição que vemos aquela primeira estrela?

- Acho que não! A luz vem sempre em linha reta. Se ela mudasse de posição seria como o caso da formiga. Mas, não pode.

- Como é que você sabe que não pode? Já fez uma observação desse tipo?

- Não! Mas, isso é algo intuitivo!

- Pois, esse tipo de observação cuidadosa ele já foi feita e é preciso termos mais cuidado com as nossas intuições; afinal elas englobam parte de nossos preconceitos, de nossa própria formação cultural. Nossas percepções aparentemente mais óbvias não estão livres dessas influências. Meu colega na Universidade de Berlim, o psicólogo alemão Max Wertheimer conversava muito comigo sobre essas coisas estranhas da mente humana e ele até elaborou, inspirado parcialmente nessas nossas conversas, uma Psicologia baseada nessas coisas: a Teoria da Gestalt. Imagine; apenas imagine,

madame Cacá, que durante um Eclipse nós observássemos algo assim; observássemos que a estrela tivesse mudado de posição; como poderíamos explicar isso?

- O raio de luz que vem da segunda estrela teria sido puxado de lado.

- Mas, aplicar a lei da Gravitação Universal Newtoniana a um releu fóton de luz, ao meu querido “lichtquanta”, é algo bastante problemático. Que outra explicação você poderia dar se agora a trajetória mudasse?

- Saquei! Ao falar que a trajetória da luz mudou, nós podemos dizer que foi o espaço onde ela se move que se curvou.

- Isso!

- Mas, Herr Einstein, quem curvou a trajetória da luz? A estrela próxima da qual a luz vinda da outra passou?

- Sim! A estrela é um objeto cósmico com uma massa enorme e isso é determinante para que ela consiga curvar perceptivelmente o espaço ao seu redor ou, dizendo de outro modo, seja capaz de introduzir restrições topológicas perceptíveis no mesmo, o que é fundamentalmente outra forma de se interpretar o próprio conceito de Campo.

- Entendi! Mas, como se pode relacionar de uma forma simples a massa da estrela com a curvatura que desvia a luz?

- Vou usar uma metáfora criada pelo John Archibald Wheeler que foi o orientador de doutorado do Richard Feynman: “A matéria diz ao espaço como se curvar e o espaço diz à matéria como se mover”. Você ainda pode refinar essa frase e trocar a palavra espaço por espaço-tempo; mas para o efeito do que você me perguntou isso já basta. Risos ...

- Puxa, Herr Einstein! Isso é complicado; mas é também muito bonito! Eu acho que já estou percebendo que essa coisa já não me parece mais um completo absurdo. Valeu!

Neste momento, após essa longa conversa do velho Albert com a Calina, o nosso amigo holandês Van Borbha relembra o velho Albert de sua outra colocação anterior.

- Muito interessante essa sua “transposição didática”, Herr Einstein; mas e quanto ao percurso histórico evolutivo que lhe levou a essas concepções e que o senhor mesmo falou que poderia servir para esclarecer a questão matemática do momento quadrupolar no caso das ondas gravitacionais? Como o senhor chegou a elas?

- Ótima pergunta, Van Borbha; emenda o nosso amigo Charles Robert Des Saints.

- Pois bem, meus caros Mr. Van Borbha e Monsieur Des Saints! Vamos retro-

ceder um pouco na história para ver como eu cheguei até essa questão das Ondas Gravitacionais. Não é um relato linear; mas, sim cheio de idas e vindas, de mudanças de direção interpretativa. Percebam logo que da explicação metafórica que eu dei à madame Cacá sobre as mudanças topológicas depreende-se que eu precisei usar não exatamente a Geometria Clássica, mas sim a Geometria Diferencial e o Cálculo Tensorial para lidar com os problemas confrontados.

- Mas, como foi, resumidamente, essa história? – Pergunta; já inquieto, o nosso amigo camaronês Cyrano Bahr Etto.

- Bem, Monsieur Bahr Etto; como vocês todos sabem, a gravidade tem sido um grande mistério desde a Antiguidade.

Ao ouvir Herr Einstein falar na palavra “Antiguidade” eu penso logo: “estou frito!”. Essa conversa do nosso bom velhinho vai ficar muito longa e a entrevista não vai ser publicada. Mas, o que fazer se ele já não gostou de minha primeira tentativa de apressar o passo de sua narrativa? E, agora, com essa de explicar a origem de sua Relatividade Geral para só então continuar sua narrativa sobre as Ondas Gravitacionais é que a vaca vai para o brejo.

Enquanto penso isso, o velho Albert prossegue a sua atraente narrativa histórica.

- A gravidade é algo invisível e que foi relacionada, originalmente e de forma misteriosa, à queda dos corpos.

Calina emenda a observação:

- E como era vista a força gravitacional na Antiguidade?

- Na verdade, madame Cacá – diz o velho Albert – nem como uma “força” ela era exatamente vista na Antiguidade; mas, sim como uma propriedade intrínseca dos corpos. Para Aristóteles, por exemplo, os corpos que caíam em direção à Terra, os ditos “graves”, assim o faziam segundo um movimento tido como sendo “natural” e para o qual não se fazia necessário invocar algo externo como uma “força” ou “vis”, como nos movimentos de lançamentos de projéteis que eram ditos “forçados”. O corpo caía para, segundo Aristóteles, “realizar” aquilo que já possuía em “potência” buscando o seu “estado natural” em seu “lugar natural”. O “peso” era visto, nesse contexto aristotélico, como sendo uma “propriedade inerente” do objeto e não como o resultado de uma ação externa e exercida sobre o mesmo. Trata-se de uma perspectiva histórica e cultural completamente diversa da visão galileiana e newtoniana; de outra “visão de mundo”. A Física aristotélica era uma Física teleológica, ou seja, que estava baseada nas

busca de “causas finais”. Mas, deixemos de lado esse antigo capítulo da história da Física e seus conceitos de há muito já abandonados e vejamos como a coisa passou a ser vista nos tempos mais recentes de Galileu e Newton.

Eu fico aliviado em ouvir o Albert dizer aquilo, apesar de eu certamente estar curtindo aquelas suas digressões histórico-culturais sobre a formação de nossos conceitos mais básicos, pois já estava com medo que ele se demorasse demais nessas questões fundamentais mais antigas e a sua entrevista se tornasse inviável de ser publicada por se tornar muito longa.

- No final do século XVI e início do século XVII – prossegue o Albert – Galileu inaugura uma nova atitude realista e experimental diante da interpretação da Natureza, ainda que baseada nas contribuições de muitos outros pensadores mais antigos, como Platão e Arquimedes. De Platão ele captura a valorização da Matemática na representação da realidade e de Arquimedes ele se apodera do recurso, agora abertamente assumido, ao experimento; seja ele real ou “em pensamento” como os que eu mesmo sempre gostei de desenvolver.

- O que o senhor diria que Galileu trouxe de novo, no tocante à abordagem da gravidade? – arremata Cyrano.

- Eu diria, Monsieur Bahr Etto, que Galileu descobriu que um objeto pesado, assim como um objeto leve; caem na verdade em “queda livre” com a mesma “aceleração” atingindo a mesma velocidade em um “vácuo” idealmente construído e que isso lhe revela que a gravidade não pode ser algo meramente “intrínseco” ao corpo dito “grave”, como supunha Aristóteles; mas, que deve estar também relacionado a algo exterior ao mesmo. E serve muito bem para ele se introduzir no estudo posterior das quedas em meios resistivos mais complexos. Isso lhe permite também “matematizar” esta situação para além de seu “experimento em pensamento” e lhe leva também a realizar experimentos reais com pêndulos e com planos inclinados.

- Sim, observa nosso amigo holandês Van Borbha; mas, essa gravidade invisível de que o senhor fala, agia de forma misteriosa, mesmo para Newton. De forma, digamos um tanto fantasmagórica, sinistra, pois parece se manifestar através do espaço para alcançar os objetos por uma enigmática “ação à distância” sem que nenhum óbvio mecanismo justificasse essa propriedade. É certo para todos que aquilo que sobe tem de descer, mas exatamente “porque” isso nunca pareceu óbvio.

- Exatamente, meu caro Mr. Van Borbha! E essa angustiante questão epistemológica da falta de explicação para essa “ação à distância” serviu de crítica ao Newton por parte do bispo Berkeley. O Bentley foi em auxílio do Newton respondendo que a gravidade era uma propriedade da Natureza; mas o próprio Newton não assumiu esta resposta do Bentley e preferiu dizer cautelosamente que “não sabia a resposta”. Mas, na verdade, para ele o tempo fluía de forma contínua e o espaço era isotrópico e visto mesmo como sendo o “sensório de Deus”. Desde a década de 1930 se descobriu que existem quatro forças fundamentais na Natureza: a gravitacional, a eletromagnética, a nuclear forte e a nuclear fraca e que a força gravitacional é a mais débil das quatro, ainda que seja ela talvez a mais importante das quatro por sua vasta atuação cósmica e que de certo modo deu forma ao Universo. Mas, notem que na época em que eu elaborei a Teoria da Relatividade Geral, na segunda década do século XX, apenas as forças gravitacional e eletromagnética eram conhecidas.

- E como isso se deu Herr Einstein? – Digo eu, tentando disfarçadamente apressar o passo de sua interessante, porém longa narrativa histórica. Ele, entretanto, parece não ligar muito para o meu esforço de apressar sua narrativa e ainda complementa:

- Antes de falar sobre como surgiu a minha Teoria da Relatividade Geral, notem que antes do advento da mesma, a Lei da Gravitação Universal de Newton tinha sido aceita por mais de duzentos anos como uma descrição válida e coerente da força gravitacional entre as massas, embora o próprio Newton não tenha considerado sua teoria como a palavra final sobre a natureza da gravidade. Dentro de um século desde a formulação da Teoria Gravitacional de Newton, observações astronômicas cuidadosas revelaram variações inexplicáveis entre sua teoria e as tais observações. No modelo de Newton, a gravidade era o resultado de uma força de atração entre objetos maciços. Embora, como eu já disse, até mesmo o próprio Newton tenha se mostrado incomodado com a natureza desconhecida e enigmática dessa força gravitacional, a estrutura matemática básica descritiva da atuação da mesma por ele elaborada foi extremamente bem sucedida em descrever o movimento em geral. Dentre as coisas inexplicáveis, entretanto, segundo a Teoria Newtoniana, estavam as anomalias observadas nas órbitas de Mercúrio e de outros planetas e que só teriam uma explicação plausível após o advento de minha própria

Teoria da Relatividade Geral ou da Gravitação.

- Herr Einstein, por favor, desenvolva um pouco mais os seus comentários sobre essas limitações explicativas da Teoria de Newton em comparação com suas evidentes e reconhecidas potencialidades em relação à sua nova Teoria da Relatividade Geral – pede o Carlos Reys.

- Ótima lembrança, Dom Carlos! Não podemos apenas criticar as limitações da Teoria Newtoniana; mas é conveniente mostrar como mesmo suas potencialidades quando devidamente exploradas conduziram a alguns importantes impasses, como eu já me referi antes. Para falar um pouco mais de tais limitações e potencialidades, eu gostaria de lembrar que o conceito de Buraco Negro, nasceu como uma consequência direta de minha Teoria da Relatividade Geral; mas que já havia sido antecipado, ainda que de forma paradoxal, no contexto da Teoria Newtoniana.

- Como assim? – Indaga Cyrano – Não entendi!

- É que no final dos anos 1700, Monsieur Bahr Etto, o professor britânico John Michell e o astrônomo e matemático francês Pierre-Simon Laplace apresentaram a arrojada ideia daquilo que Laplace chamou de “corpos escuros” e que se aproxima muito do moderno conceito de “Buracos Negros”. Usando conceitos de luz e de gravidade retirados da Teoria de Newton, eles argumentaram que a força gravitacional de uma estrela maciça poderia ser suficientemente grande a ponto de impedir que a luz escapasse da mesma. Infelizmente, porém, a Teoria de Newton não poderia descrever o que acontece quando a gravidade cresce de modo tão exagerado. Esse entendimento só viria a partir do desenvolvimento de minha Teoria da Relatividade Geral na segunda década do Século XX e que trata a gravidade, como eu já mencionei anteriormente em nossa conversa, como sendo uma distorção do espaço-tempo e que permite que os físicos possam descrever os buracos negros em detalhes surpreendentes.

- E que outras potencialidades ou previsões de sua Teoria da Relatividade Geral o senhor destacaria? – Pergunta o nosso amigo camaronês.

- A Teoria da Relatividade Geral prevê vários novos efeitos da gravidade, Monsieur Bahr Etto; tais como as já mencionadas Ondas Gravitacionais, as Lentes Gravitacionais e um surpreendente efeito da gravidade sobre o tempo que é conhecido como “dilatação gravitacional do tempo” e que foi bem explorado pelo físico americano Kip Thorne no recente filme

Interstellar. Muitas destas previsões já foram confirmadas pela experiência observacional, enquanto outras são ainda objetos de intensas investigações ainda em curso...

Calina não se contém e observa:

- Mas, o senhor não morreu em 1955? Como é que sabe sobre esse filme recente?

- Madame Cacá, mais absurdo do que ter assistido esse filme recente é eu estar aqui, agora mesmo, conversando com vocês, não acha? Risos ...

Todos dão um riso sem graça misturado com a mesma sensação de estarem simultaneamente curtindo a conversa sem conseguirem compreender direito como ela possa estar ocorrendo; mas preferem dar sequência à mesma sem questionar esse ponto paradoxal.

- E como o senhor definiria as potencialidades explicativas atuais da Relatividade Geral? - Emenda o nosso amigo francês Charles Robert.

- A Relatividade Geral, Monsieur Des Saints; tornou-se uma ferramenta essencial na Astrofísica moderna. Ela fornece a base para a compreensão atual dos Buracos Negros, essas regiões do espaço onde a atração gravitacional é tão forte que aparentemente nem mesmo a luz poderia escapar, embora haja controvérsias quanto aos limites rigorosos dessa questão que foram levantadas pelo Stephen Hawking ao introduzir mais recentemente a sua frutífera ideia da radiação emitida pelos Buracos Negros que agora leva o seu nome e que em última instância os faz "evaporar". Sem adentrar mais profundamente nesse debate mais recente, certo é que a sua forte gravidade é pensada também como sendo a responsável pela intensa radiação emitida por certos tipos de objetos astronômicos enigmáticos como os núcleos galácticos ativos e os quasares. A Relatividade Geral é também parte fundamental do quadro do Modelo Padrão do Big Bang da Moderna Cosmologia. Uma teoria em Física não tem valor científico se não é capaz de fazer previsões específicas que possam ser testadas em laboratórios ou em observatórios astronômicos. Neste aspecto, a Teoria da Relatividade Geral brilha de forma espetacular.

- É interessante notar, Herr Einstein - diz Van Borbha - que, infelizmente, muitos leigos e até mesmo alguns estudantes e professores de Física têm uma ideia equivocada de que a Relatividade Geral é algo meramente abstrato e sem conexão direta com a realidade; quase uma inutilidade matemática; talvez em face de sua evidente complexidade.

- De fato, Mr. Van Borbha! - Diz o velho Albert - Uma lista completa de

importantes fenômenos previstos pela Relatividade Geral e já devidamente verificados seria muito longa; mas vale a pena lembrar-se de uma forma um pouco mais precisa desses principais fenômenos.

- Isso me parece bastante ilustrativo, Herr Einstein! Diz o nosso amigo cubano - O senhor poderia listar esses fenômenos?

- Eis, sucintamente, algumas previsões confirmadas da Teoria da Relatividade Geral, Dom Carlos. Primeiramente, o desvio dos raios de luz ao passar nas cercanias de estrelas; um fenômeno observado por Arthur Eddington em 1919. Depois, a existência dos Buracos Negros; algo corroborado por múltiplas observações astronômicas. A ideia de que o tempo transcorre mais lentamente onde a gravidade é mais intensa; um fenômeno medido por Hafele e Keating em 1971. O conceito de que o Universo se expande; um fenômeno constatado observacionalmente por Edwin Hubble em 1929. A afirmativa de que os objetos astronômicos em rotação arrastam o espaço como se este fosse um mel; um fenômeno observado com o auxílio do satélite Gravity Probe B em 2011. A consequência de que o periélio de Mercúrio se desloca a cada ano por uma distância apreciável; um fenômeno que já havia sido observado por astrônomos no século XIX. A ideia de que um par de estrelas circulando um centro de massa comum emite ondas gravitacionais; um fenômeno observado indiretamente por Hulse e Taylor em 1975 e que lhes valeu o prêmio Nobel de 1993. A ideia de que a frequência da luz é afetada pela gravidade; um fenômeno observado por Pound e Rebka em 1960. O conceito de que a gravidade e a inércia são equivalentes; algo comprovado por Roll, Krotkov e Dicke em 1964. A previsão de que os Buracos Negros que espiralam em torno de um centro de massa comum, um em direção ao outro, emitem ondas gravitacionais; um fenômeno observado em setembro de 2015 pela equipe de físicos do LIGO e comunicado ao mundo neste ano de 2016.

- Excelente resumo das previsões e confirmações da Relatividade Geral, Herr Einstein!

- Obrigado, Dom Carlos. O senhor é muito gentil.

- Mas, e as origens de sua Teoria da Relatividade Geral sobre as quais o senhor disse que ia falar, Herr Einstein? - Cobra o nosso amigo holandês.

- Isso, Mr. Van Borbha! Como eu já disse antes, eu apresentei a Teoria da Relatividade Restrita em 1905 e a razão para o desenvolvimento da Relatividade Geral foi a preferência do movimento inercial no escopo da Relatividade Restrita, en-

quanto que uma teoria que, desde o início não privilegiasse nenhum estado especial de movimento (mesmo aqueles acelerados) me parecia algo bem mais satisfatório que ela. Assim, enquanto eu ainda estava trabalhando no Escritório de Patentes em Berna, em 1907, eu tive o que costumo chamar de "o pensamento mais produtivo" de toda a minha vida. Eu percebi que o Princípio da Relatividade poderia ser estendido para os Campos Gravitacionais ao imaginar um pintor em queda livre. Eu publiquei no ano seguinte um artigo no qual tecia considerações sobre a aceleração, ainda no escopo da Relatividade Restrita. Nesse artigo, eu argumentava que para um observador em queda livre as regras da Relatividade Restrita deveriam também ser aplicáveis. Este meu argumento fundamental é chamado de "Princípio da Equivalência". Nesse mesmo artigo, eu já previ também, ainda que de forma embrionária, o fenômeno da dilatação gravitacional do tempo.

- Mas, isso ainda era feito de modo intuitivo ou já perfeitamente sistematizado do ponto de vista matemático? - Arremata Van Borbha.

- Meu artigo era ainda bastante intuitivo; aliás, eu sempre fui muito intuitivo e sempre raciocinei muito por imagens para elaborar meus famosos "experimentos em pensamento". Risos ... Meu pensamento sempre foi assumidamente imagético por natureza. Mas, a coisa toda ainda estava em seu estado germinal e para ser sincero, eu ainda não possuía as necessárias ferramentas matemáticas para enquadrar devidamente o complexo problema teórico então apenas inicialmente enfocado.

- E como o senhor progrediu em direção à sua Teoria da Relatividade Geral, Herr Einstein? - Pergunta o nosso amigo Cyrano.

- Em 1911, Monsieur Bahr Etto, eu publiquei outro artigo expandindo aquele meu artigo mais intuitivo. Ali eu já pensei sobre o caso hipotético de uma caixa uniformemente acelerada não em um campo gravitacional e observei que os efeitos observados seriam indistinguíveis daqueles observados em uma caixa que estivesse imersa em um campo gravitacional estacionário. Eu usei ainda a Relatividade Restrita para mostrar que a taxa de avanço de relógios colocados na referida caixa dependeriam de suas posições no campo gravitacional, e que a diferença das taxas deveria ser proporcional ao potencial gravitacional em primeira aproximação. Eu também fiz então a previsão de que a luz sofreria uma deflexão causada por corpos massivos. Embora minha aproxi-

mação fosse ainda rudimentar, ela já me permitia mostrar que tal deflexão deveria existir e que não seria nula. As aproximações ainda não funcionavam bem para objetos próximos da velocidade da luz e apenas mais tarde, quando eu consegui concluir minha formulação da Teoria da Relatividade Geral, foi que este erro foi retificado e a previsão correta da deflexão da luz pelo Sol foi feita.

- Mas, como as novas Matemáticas, especialmente a Geometria Riemanianna, entraram em sua Teoria, Herr Einstein? - Indaga o nosso amigo Carlos Reys.

- Se bem me lembro, Dom Carlos, isso me foi bastante facilitado pela ajuda de meu velho amigo e antigo colega na ETH, o Marcel Grossmann que sugeriu as leituras adequadas das ferramentas matemáticas que ainda me faltavam. Mas, do ponto de vista de sua necessidade a coisa surgiu no contexto de meus novos "experimentos em pensamento" sobre a natureza do campo gravitacional de um disco rotativo. Eu imaginei um observador realizando os experimentos em uma plataforma giratória. Eu percebi que este observador iria encontrar um valor diferente para a constante matemática π que aquele previsto pela geometria euclidiana.

- Como, assim, Herr Einstein? - Interrompe o nosso amigo Cyrano. Essa me parece ser uma constante universal.

- A razão para isso, Monsieur Bahr Etto; é que o raio de um círculo seria medido com uma régua não contraída; mas, de acordo com a Relatividade Restrita, a circunferência deveria parecer maior para este observador porque a régua sofreria uma contração em seu comprimento. Como eu acreditava que as leis da Física eram localmente válidas; descritas por campos locais, eu concluí que o espaço-tempo poderia ser curvado localmente. Foi isso que me levou a estudar a Geometria de Riemann e a formular a Relatividade Geral nesta nova linguagem matemática.

- Muito interessante, Herr Einstein! - Observam juntos Charles Robert, Carlos Reys e Van Borbha.

O velho Albert sorri encabulado com a apreciação dos nossos amigos e eu aproveito para lhe oferecer uma água de coco que ele aceita, de imediato, evidenciando já estar com a garganta seca. Ele olha para mim e me pergunta, meio sem jeito:

- Aqui também tem aquela deliciosa panqueca branca que eu comi lá em Campina Grande?

- Que panqueca é essa, Alexandre? - Pergunta Cyrano.

- Não é uma panqueca, Cyrano. É que o Albert não sabe o nome. É a nossa velha e conhecida tapioca. Tem, sim, Herr Eins-

tein! Eu vou buscar uma para o senhor no balcão, já que esse garçom não passa aqui.

Vou até ao balcão; volto com a tapioca e encontro Herr Einstein já no meio da conversa contando como ele progredira em seu trabalho, já então bastante matematizado pelas novas ferramentas teóricas por ele introduzidas e oriundas da Geometria de Riemann, durante o ano de 1915.

- Eu percebi que a covariância geral era algo realmente defensável e consegui compatibilizá-la com o determinismo em que eu sempre acreditei. Só então, já em outubro de 1915, eu consegui rapidamente completar o desenvolvimento das Equações de Campo que vieram a receber o meu nome. No entanto, eu cometi um erro que agora é famoso.

- O que? O senhor cometeu um erro, Herr Einstein: - Diz, surpresa, Calina.

- Isso, madame Cacá! Eu usei as poderosas ferramentas matemáticas do tensor de Ricci e do tensor momento-energia em minhas Equações de Campo e fiz previsões a respeito da precessão do periélio de Mercúrio; mas logo percebi que elas eram incompatíveis com a Conservação local do momento e da energia a não ser que o Universo tivesse uma densidade constante de massa-energia-momento; ou seja, que as pedras, a água e até mesmo o ar e o vácuo tivessem todos eles a mesma densidade, o que era flagrantemente absurdo. Tive de refazer os cálculos e só consegui obter as Equações de Campo corretas no final de 1915; mais precisamente eu as apresentei à Academia Prussiana de Ciências no dia 25 de novembro. Com a publicação das Equações de Campo, o problema passou a ser resolvê-las para vários casos diferentes e interpretar as soluções obtidas. Vale salientar que este é um problema ainda válido e em andamento e que inclui também a verificação experimental de tais conclusões obtidas e ele tem dominado a pesquisa em Relatividade Geral desde aquela época. Os trabalhos recentes relacionados com a observação das Ondas Gravitacionais fazem ainda parte desta longa e complexa agenda.

Calina insiste nesse ponto e pergunta ao velho Albert como eram essas suas tais Equações Relativistas do Campo Gravitacional. Carlos Reys olha apreensivo para o Van Borbha e em seguida para o Charles Robert. Eu sinto que eles percebem que o tempo pode fechar se o velhinho começar a falar agora na espinhosa Matemática da Análise Tensorial de suas equações. O Cyrano também percebe a enrascada em que nossa conversa pode cair e alivia a pergunta da Calina.

- Por favor, Herr Einstein; explique

apenas por alto o significado geral das suas equações para que essa coisa tão complexa fique mais palatável. Não precisa entrar em detalhes mais técnicos.

Albert faz uma careta de quem não gostou muito daquela recomendação; mas diz que fará o o que estiver ao seu alcance para tentar ser o mais claro possível.

- Eu sei bem das dificuldades de compreender a Relatividade. Até escrevi um livro sobre ela para leigos. Na parte referente à Relatividade Restrita eu até criei aquela metáfora que vocês ainda usam muito em sala de aula dos espelhos em um trem em movimento; lembram-se dela?

- Claro, Herr Einstein; nós a usamos frequentemente em nossas aulas de Física Moderna como uma "transposição didática" mais palatável para os nossos estudantes na Universidade do que a discussão mais detalhada do experimento de Michelson-Morley como gostam de fazer muitos livros. Prossiga! - Diz o Carlos Reys.

- Pois, bem! No caso da Relatividade Geral, a coisa é um pouco mais complexa. Em quatro artigos, apresentados em novembro 1915 à Academia Prussiana de Ciências, em Berlim, eu introduzi uma nova formulação dos conceitos que relacionavam o espaço com a gravidade. Ao final desse empreendimento, eu cheguei a uma Equação do Campo Gravitacional que indica que a gravidade é uma manifestação da curvatura do espaço.

Ele pega um guardanapo na mesa e tira uma velha caneta tinteiro do bolso da camisa que é certamente mais antiga que a já velha Parker 51 e com ela rabisca a famosa expressão matemática de sua Equação Relativística do Campo Gravitacional, o coração da Teoria da Relatividade Geral:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

Vejam! Esta é a minha Equação Relativística do Campo Gravitacional!

Calina olha apavorada para Cyrano, mas ainda assim interrompe a narrativa do velho Albert e diz arrojadamente:

- É apenas uma equação, Herr Einstein? Eu pensei que o senhor tinha falado no plural: "as equações".

- Boa pergunta, madame Calina! - Diz o velhinho sorrindo, mas sem usar o apelido "Cacá" que ele até agora empregara - Trata-se, realmente, de um sistema de equações; mas elas podem ser resumidas didaticamente em uma única equação, como eu vou tentar explicar.

- OK, professor! Obrigada! Desculpe!

- Não há porque se desculpar, ma-

dame Cacá! Sua dúvida é perfeitamente válida e eu vou explicar por que. Vejam! O lado esquerdo da Equação Relativística do Campo Gravitacional descreve a geometria do espaço-tempo (R), enquanto o lado direito da mesma controla a distribuição de energia e momento (T). Ou, como disse o John Wheeler de forma metafórica e muito feliz: “o espaço (do lado esquerdo) diz à matéria como se mover, enquanto a matéria (do lado direito) diz ao espaço como se curvar”. Os índices subscritos representados pelas letras gregas representam as quatro dimensões do espaço e do tempo. Pode não necessariamente parecer, mas essas letras gregas subscritas são como uma oferta inoperante. Os símbolos aqui não representam apenas números quaisquer; eles representam tensores, que podem livremente ser pensados como sendo uma generalização do conceito de vetores; como sendo matrizes 4×4 de números, com as suas próprias regras especiais para a multiplicação e para a divisão. Esta é na verdade uma forma compacta de representar as dez equações que precisam ser resolvidas simultaneamente para que se possa fazer qualquer previsão sobre a realidade física.

- Mas, fisicamente – observa o Cyrano – o que esta sintética equação tenta comunicar sobre a realidade, Herr Einstein?

- Ela nos diz, monsieur Bahr Etto, que qualquer matéria nas vizinhanças de um objeto massivo irá se mover ao longo de curvas geodésicas através do espaço-tempo curvo e que não são necessariamente linhas retas no espaço.

- Mas, qual é o resultado disso, professor? – Pergunta novamente Calina.

- O resultado, madame Cacá é que para um observador assistindo a um objeto material se mover, este lhe parecerá estar sujeito a uma hipotética “força”. A suposta “força” neste caso é a gravidade; mas é importante notar que esta é apenas uma espécie de “tradução vulgar para os termos clássicos”, pois rigorosamente falando, não há força gravitacional na Relatividade Geral e a gravitação é vista como devida à curvatura do espaço. E, para complementar; o símbolo nesta equação que, na verdade, representa um número já bastante familiar é o G maiúsculo, que é a mesma constante gravitacional contida na Equação de Newton para a Gravitação.

- Mas, qual é o objetivo da Relatividade ao fazer isso, Herr Einstein? – Diz mais uma vez Calina.

- O objetivo da Relatividade Geral é resolver esta equação, madame Cacá; ou, na verdade, essas equações; para

o $g_{\mu\nu}$ ou o “tensor métrico” ou simplesmente a “métrica” que é um tensor covariante de segunda ordem, algo que determina todas as propriedades do espaço curvo. Em um tradicional espaço euclidiano, a soma dos ângulos internos de um triângulo é 180 graus; mas na Geometria Riemanniana esta soma pode ter um valor diferente. Sem curvatura, a soma dá 180 graus; mas com curvatura positiva ela é maior que 180 graus e com curvatura negativa é menor que 180 graus. O “espaço-tempo” é simplesmente um espaço Riemanniano com 4 dimensões e com uma métrica. As soluções dessa equação nos dizem muito sobre a realidade física.

- Como assim? O que isso nos diz, professor? – Pergunta ainda Calina meio aflita.

- Ela nos diz que a presença de matéria provoca uma mudança na maneira de medir a distância e o tempo, dependendo de onde você está em relação a um objeto de grande massa. Isto significa que aquilo que um observador vê como uma distância no espaço parece para outro observador em uma posição distante como sendo uma mistura da distância tanto no espaço quanto no tempo. Um observador sentado perto de um objeto massivo na superfície da Terra; vai observar o tempo passar a uma taxa diferente daquela que um observador que está mais distante, como por exemplo, em um satélite em órbita vê o mesmo fenômeno. E um comprimento medido por um observador próximo a um objeto de grande massa não vai estar de acordo com a mesma distância medida por um observador mais longe deste objeto massivo.

- Desculpe, Herr Einstein – Diz Cyrano – Mas, isso tudo me parece um bocado bizarro. Risos...

- Isso pode até parecer mesmo completamente bizarro, mas é absolutamente e inequivocamente verdade, como foi demonstrado, por exemplo, pelo Sistema de Posicionamento Global (GPS) que vocês usam atualmente de forma corriqueira, até mesmo em seus aparelhos celulares. Os satélites que compõem o sistema de GPS contêm relógios atômicos que transmitem um sinal de tempo, e a taxa em que esses relógios “avançam” tem de ser ajustada para se levar em conta a Relatividade Geral. Sem a correção relativística, os relógios derivariam por cerca de 38 microsegundos por dia; correspondendo a aproximadamente 11 km da incerteza na posição. Como o sistema trabalha para dar a você a sua posição sobre a Terra em uma faixa de poucos metros (na maioria das vezes); sabemos que a correção relativista

funciona e que a Relatividade Geral está correta. E, portanto, se há algo que pode parecer realmente bizarro é a estrutura matemática inerente à própria Natureza; mas essa bizarrice tende a se transformar na mais pura beleza se for devidamente compreendida. No fundo, eu sempre acreditei que a Natureza segue rigorosos e elegantes princípios “estéticos” que podem ser bem contemplados tanto na Relatividade Geral quanto, por exemplo, no Teorema de Noether que relaciona os Princípios de Conservação com as Simetrias da Realidade física.

- Essa beleza é fogo de se contemplar, professor! E o que é aquele V de cabeça para baixo em sua equação? – Pergunta sorrindo a Calina.

- A dialética da contemplação da beleza expressa em suas formas mais simples e sua aparente e intrínseca dificuldade de se revelar é um enigma inerente à Natureza, madame Cacá. Quanto ao “ V de cabeça para baixo” da equação do campo gravitacional, ele é na verdade a letra maiúscula grega Lambda.

- Mas, o que eu quero saber é o que esse tal letra Lambda significa fisicamente na sua equação, Herr Einstein.

- Ela é a misteriosa constante cosmológica, Calina. – Diz o Carlos Reys.

- E o que é essa tal constante cosmológica? Insiste Calina.

Eu ouço aquilo e penso cá com o meus botões: “lascou!” Se o velho for responder a essa pergunta nossa conversa não termina mais hoje, pois vamos facilmente cair no problema ainda não resolvido da Energia Escura. Mas, o Albert parece se divertir com as respostas dos nossos amigos à dúvida de Calina e se dispõe a explicar mais detalhadamente a questão, para o meu desespero de que ele não volte mais ao tema central das Ondas Gravitacionais. E para completar o meu receio, o Van Borbha ainda completa de forma direta:

- Isso está relacionado com a Energia Escura, não é mesmo Herr Einstein?

Pronto! – Penso eu – É só o que faltava para o velho não voltar mais para o assunto. E neste exato momento, ele começa a explicar a questão levantada sobre o tal “ V de cabeça para baixo”.

- Vejam! Para vocês entenderem o significado desse tal “ V de cabeça para baixo”, como disse a madame Cacá, eu vou precisar de contar um pouco da minha própria história a esse respeito.

O Carlos Reys se anima com essa observação do velho e diz logo:

- Vá em frente, Herr Einstein. Temos todo o tempo do mundo. Somos todos ouvidos. Conte a sua história.

Ainda bem que o velho Albert leva

na brincadeira essa estória do Carlos dizer que nós “temos todo o tempo do mundo”. Se ele pegasse para valer nessa afirmativa, a conversa não acabaria mais hoje.

- Pois bem! Quando eu propus a minha Teoria da Relatividade Geral em 1915 e início de 1916, eu ainda não sabia que o Universo estava em expansão. Em minha mente, o tamanho do cosmos era fixo e, portanto, o Universo era estático. Entretanto, as soluções iniciais da minha Equação Relativística do Campo Gravitacional apontavam para um Universo em expansão; o que me parecia algo inaceitável.

- E o que o senhor fez com aquilo que lhe parecia um desencontro? - Pergunta o Cyrano.

- Descontente com esta situação, Monsieur Bahr Etto, eu incluí em minha Equação Relativística do Campo Gravitacional um termo aditivo ao qual denominei de Constante Cosmológica para a Relatividade Geral, sem o qual as equações, aparentemente, não permitiriam a existência de um Universo Estático, já que a gravidade faria com que o Universo; que estava inicialmente em equilíbrio dinâmico, entrasse em colapso. Foi, portanto, para contrabalançar este indesejável efeito colapsante da gravidade que eu adicionei a tal Constante Cosmológica que é simbolizada pelo tal Λ ou “V de cabeça para baixo”. Risos...

- Mas, qual é o significado dessa constante, Herr Einstein? - Atalha o Cyrano.

- O significado físico da Constante Cosmológica Λ , Monsieur Bahr Etto, é o valor da densidade de energia do vácuo.

- E o que isso mudaria no Universo com ela ou sem ela? - Pergunta Calina.

- Sem ela, madame Cacá, o Universo teria se contraído ou expandido de acordo com a quantidade de massa existente no mesmo. Ela atuaria, portanto, como se fosse uma força repulsiva misteriosa e seria aquilo que manteria tudo junto em seu respectivo lugar.

- Mas, o Universo não é estático. - Observa Cyrano.

- Sim, Monsieur Bahr Etto! Mas, eu já disse que eu não sabia naquela época que o Universo não era estático. Aliás, ninguém sabia! A referida questão era ainda uma matéria opinativa e em discussão que dependia mais de convicções filosóficas e religiosas ou não. Contudo, em 1929 as observações astronômicas do Edwin Hubble indicaram que o Universo parecia estar se expandindo; o que era consistente com uma solução para as minhas Equações Relativísticas originais que havia sido encontrada pelo matemático russo Alexander Friedmann. Hubble havia descoberto

que todas as galáxias, fora do Grupo Local (ao qual pertence a nossa Via Láctea) estavam se afastando umas das outras, o que implicava que o Universo estava em expansão.

- E aí, o que o senhor fez? - Pergunta o Charles Robert.

- Nestas condições, Monsieur Des Saints, eu tive de rever minha ideia da Constante Cosmológica e naquele mesmo ano de 1929, eu a retirei das Equações Relativísticas para o Campo Gravitacional. Eu passei, desde então, a me referir a ela como o maior erro de minha vida. Eu não tinha como perceber, naquela época, que na verdade, adicionar a Constante Cosmológica às referidas equações é algo que não leva necessariamente a um Universo Estático em equilíbrio, pois o equilíbrio universal é instável. Se o Universo se expande um pouco, então a expansão libera energia do vácuo, o que provoca ainda mais expansão. Da mesma forma, um Universo que contrai ligeiramente continuará a se contrair. Mas, a Teoria como um todo ainda estava tomando forma em minha cabeça, sem que eu dispusesse de dados observacionais hoje facilmente disponíveis.

- E todos que trabalhavam com Relatividade Geral também abandonaram essa ideia da constante cosmológica, nessa época? - Pergunta nosso amigo holandês.

- Não, exatamente, Van Borbha! A constante cosmológica permaneceu ainda viva como um assunto de interesse teórico e empírico. Trazendo a discussão para o presente, podemos dizer que, empiricamente, a descoberta de novos dados cosmológicos nas últimas décadas sugere fortemente que o nosso Universo tem uma constante cosmológica positiva. A explicação para este seu pequeno, mas positivo valor é um desafio teórico bastante atual. Se eu ainda estivesse “na ativa” gostaria de trabalhar com esse problema. Risos...

- Ela, então, naquela época, virou uma espécie de curiosidade matemática? - Pergunta nosso amigo cubano.

- Mais ou menos, Dom Carlos! Finalmente, deve-se notar que algumas generalizações iniciais da minha Teoria da Gravitacão, conhecidas como Teorias Clássicas do Campo Unificado, ou introduziram uma constante cosmológica em termos teóricos ou descobriram que ela surgia naturalmente da Matemática empregada. O certo é que desde 1929 até o início dos anos 1990, a maioria dos pesquisadores assumiu que a constante cosmológica era igual a zero.

- Mas, como a história revelaria posteriormente, Herr Einstein, a introdução da constante cosmológica não havia sido um erro assim tão ruim. Na verdade,

ela continha realmente uma preciosa informação sobre algo fundamental no Universo. - Diz nosso amigo holandês.

- Isso, Mr. Van Borbha! A partir dos anos 1990, vários desenvolvimentos observacionais na Astronomia, especialmente a descoberta de que o Universo está não apenas em expansão; mas, sim em Expansão Acelerada; mudaram o cenário a esse respeito.

- Por que essas descobertas mudaram a forma de se encarar a constante cosmológica, Herr Einstein? - Questiona Cyrano.

- Porque esta mudança, Monsieur Bahr Etto, foi uma decorrência das observações de distantes supernovas feitas em 1998, assim como também das evidências independentes obtidas a partir da observação da Radiação Cósmica de Fundo e dos altos valores do deslocamento para o vermelho das galáxias. Este novo panorama de um Universo em expansão acelerada levou os cosmólogos a propor a existência de um novo construto teórico, ou seja a existência de algo misterioso semelhante a uma força repulsiva universal que seria fisicamente responsável por esta referida expansão universal e ao qual se convencionou denominar de Energia Escura. Os estudos seguintes levaram à conclusão de que esta coisa misteriosa e repulsiva denominada de Energia Escura deveria compor em torno de 68% do valor da densidade massa-energia do Universo. Embora o conceito de Energia Escura ainda seja enigmático a um nível fundamental, as principais propriedades necessárias para a Energia Escura são tais que ela funciona como se fosse um tipo de anti-gravidade que se dilui muito mais lentamente que a matéria na medida em que o Universo se expande e também que se aglomera muito mais fracamente que a matéria, ou talvez que nem mesmo se aglomere.

- Mas, Herr Einstein! - Diz Cyrano - O que é que isso tudo tem a ver com sua constante cosmológica?

- Há uma enorme semelhança entre esse recente construto teórico da Energia Escura e a minha velha Constante Cosmológica, Monsieur Bahr Etto, pois se sabe hoje que esta é em certa medida a forma mais simples possível da Energia Escura, desde que ela é constante tanto no espaço quanto no tempo e isto leva ao atual Modelo Padrão da Cosmologia conhecido como Modelo Lambda-CDM ou mais sucintamente Λ CDM (Lambda Cold Dark Matter) que é uma forma do Modelo Cosmológico do Big Bang no qual o Universo contém uma Constante Cosmológica denotada pela letra maiúscula grega Lambda (Λ), associada com a Energia Escura e a Matéria Escura Fria (Cold Dark

Matter ou CDM). É este Modelo Lambda-CDM que atualmente dá suporte e confere significado às muitas observações cosmológicas recentes como as anunciadas recentemente em fevereiro de 2016 sobre a observação das Ondas Gravitacionais.

Todos sorriem aliviados com o tratamento “light” e informativo que o velho Albert tenta nos dar naquele momento sobre um assunto tão importante e complexo da Física; e eu fico aliviado com o fato de que ele citou as Ondas Gravitacionais no contexto bem atual; mas, ele ainda não contou como chegou à conclusão que elas deveriam existir; e isso eu ainda quero

ouvir bem direitinho. É preciso manter esse ritmo da nossa conversa sem deixar o velho perder o rumo da prosa.

Em primeiro lugar, porque mesmo se esforçando para ser didático, o velho Albert ainda insiste em detalhar alguns aspectos matemáticos mínimos que lhe parecem relevantes; mas, que, mesmo assim, não são tão simples para o leitor iniciante compreender. E, em segundo lugar, porque essas suas considerações mais gerais o estão afastando do nosso assunto principal que são as Ondas Gravitacionais.

Certamente, essas coisas estão todas ligadas ao tecido mais amplo da Relativi-

dade Geral, mas eu temo pela demora do velho chegar lá. É preciso dar um jeito de fazê-lo tomar esse rumo. Mas, como fazer isso? E justamente nesse momento, o velho Albert para e diz sorrindo:

- Estou com fome! Aqui não tem comida? Risos ...

- Claro! – Dizemos todos ao mesmo tempo.

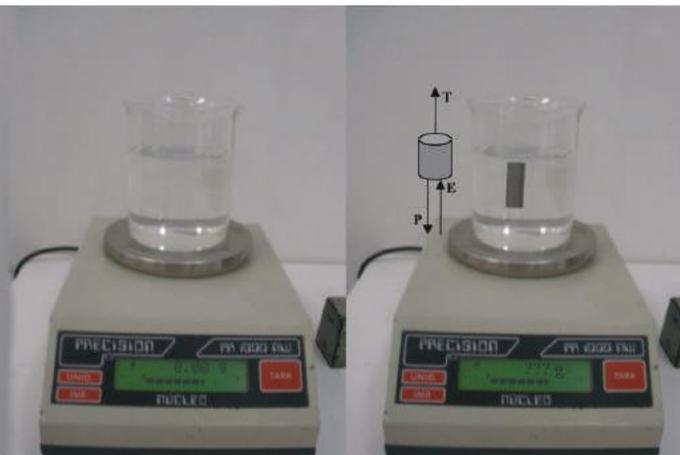
- O que o senhor quer comer? – Pergunta o Van Borbha.

- Peixada com molho de camarão! Depois do almoço a agente continua a conversa. Risos ...

Leia mais

- B. Andrews, *20 Things you Did Not Know About Gravity*. In: Discover Magazine – Special Edition: A Century of Gravitational Waves, 2015.
- A. Ashtekar (ed), *100 Years of Relativity: Space-Time Structure – Einstein and Beyond* (World Scientific Publishing, Singapore, 2005).
- M. Bartusiak, *Einstein's Unfinished Symphony*. In: Discover Magazine – Special Edition: A Century of Gravitational Waves, 2015.
- Carl Brans, *The Roots of Scalar-Tensor Theory: An Approximate History*, disponível em <http://arxiv.org/abs/gr-qc/0506063>.
- Bruce Dorminey, *General Theory of Relativity: Probing the Cosmos with Gravitational Waves*. In: Discover Magazine – Special Edition: A Century of Gravitational Waves, 2015.
- Joshua Frieman, Michel Turner and Dragan Huterer, *Dark Energy and the Accelerating Universe*, disponível em <https://arxiv.org/abs/0803.0982>.
- Hubert Goenner, *On the History of Geometrization of Space-Time: From Minkowski to Finsler Geometry*, disponível em <http://arxiv.org/abs/0811.4529>.
- Alex Harvey, *How Einstein Discovered Dark Energy*. Disponível em <http://arxiv.org/abs/1211.6338>.
- M. Hobson, G. Efstathiou and A. Lasenby, *General Relativity: An Introduction for Physicists* (Cambridge University Press, Cambridge, 2006).
- Leopold Infeld, *Quest – The Evolution of a Physicist* (Gollancz, London, 1941).
- Max Jammer, *Concepts of Simultaneity: From Antiquity to Einstein and Beyond* (The Johns Hopkins University Press, Baltimore, 2006).
- Max Jammer, *Concepts of Space: The History of Theories of Space in Physics* (Dover Publications Inc., New York, 1993).
- Max Jammer, *Einstein and Religion* (Princeton University Press, Princeton, 1999).
- Daniel Kennefick, *Controversies in the History of the Radiation Reaction Problem in General Relativity*, disponível em <http://arxiv.org/pdf/gr-qc/9704002.pdf>.
- Daniel Kennefick, *Einstein versus The Physical Review*. Physics Today, September 2005.
- Daniel Kennefick, *Traveling at the Speed of Thought. Gives an Excellent Overview of the History of Gravitational Waves*, disponível em http://www.fma.if.usp.br/~rivelles/Int_Relatividade_Geral/int_relgel.pdf.
- Imry Lakatos and Alan Musgrave, *Criticism and the Growth of Knowledge* (Cambridge University Press, Cambridge, 1970).
- Imry Lakatos, *Proofs and Refutations* (Cambridge University Press, Cambridge, 1976).
- Alexandre Medeiros e Cleide Medeiros, *Einstein e a Educação* (Editora Livraria da Física, São Paulo, 2006).
- Steve Nadis, *Beyond Einstein*. In: Discover Magazine – Special Edition: A Century of Gravitational Waves, 2015).
- Hans Ohanian, *Gravitation and Spacetime*. (W.W. Norton & Co., New York, 1976).
- Abraham Pais, *Subtle is the Lord* (Oxford University Press, Oxford, 2005).
- Henri Poincaré, *La Science et l'Hypothèse* (Dover Publications, London, 2011).
- Gabriel Popkin, *Defying Gravity*. In: Discover Magazine – Special Edition: A Century of Gravitational Waves, 2015).
- Carlos Santos, *O Plágio de Einstein* (WS Editor, Porto Alegre, 2003).
- Raymond Serway and John Jewett, *Physics for Scientists and Engineers* (Cengage Learning, New York, 2013).
- Donal Shapero (ed), *Gravitational Physics: Exploring the Structure of Space and Time* (National Academy Press, Washington, DC, 2003).
- Vesselin Petkov, *Relativity and the Nature of Spacetime* (Springer-Verlag, Berlin, 2005).
- Wolfgang Rindler, *Relativity Special, General, and Cosmological* (Oxford University Press, Oxford, 2006).
- Moritz Schlick, *Space and Time in Contemporary Physics: An Introduction to the Theory of Relativity and Gravitation* (Dover Pub Inc, New York, 2005).
- Lee Smolin, *The Trouble with Physics: The Rise of String Theory, The Fall of a Science and What Come Next* (Houghton Mifflin Company, Boston, 2006).
- John Sullivan, *Three Men Discuss Relativity* (Alfred Knopf Ed, New York, 1926).
- Richard Talcott, *Blackholes in your Backyard*. In: Discover Magazine – Special Edition: A Century of Gravitational Waves, 2015.
- The Collected Papers of Albert Einstein*. Princeton University Press, disponível em <http://einsteinpapers.press.princeton.edu/>.
- Justin Worland, *A Brief History of the Search for Gravitational Waves*. Time, Feb 11 (2016).
- Alexander Blum, Roberto Lalli and Jürgen Renn, *One Hundred Years of Gravitational Waves*. Max Planck Institute for the History of Science, disponível em <https://www.mpiwg-berlin.mpg.de/en/content/one-hundred-years-gravitational-waves>.
- Jorge Valdés, *La Grand Illusión III: Las Ondas Gravitacionales* (Fondo de Cultura Economía, Ciudad de Mexico, 1997).

O que a balança indicará?



.....
Marcos Antonio Florczak
 Universidade Tecnológica Federal do
 Paraná, Curitiba, PR, Brasil

.....
Jorge Alberto Lenz
 Universidade Tecnológica Federal do
 Paraná, Curitiba, PR, Brasil
 E-mail: lenz@utfpr.edu.br

A terceira lei de Newton afirma que a força aplicada em um corpo é igual e oposta à força aplicada ao corpo agente desta força, e vice-versa. Normalmente ela é conhecida como princípio de ação e reação.

Exemplos qualitativos são empregados em sala de aula para o ensino da terceira lei de Newton. Podemos explicar desde o caminhar de uma pessoa sobre uma superfície áspera até o movimento de voo de um avião. No laboratório de física experimental ela se constitui em um aspecto secundário e normalmente aparece apenas quando estamos elaborando um diagrama de forças de dois objetos em interação.

Neste trabalho propomos uma atividade experimental que tem por objetivo investigar estes pares de forças (também denominados “ação e reação”). O estudante é instigado a pensar e analisar o conjunto de forças atuantes sobre um corpo mergulhado em água dentro de um recipiente, sem tocar o fundo do mesmo, e sobre uma balança, para decidir qual é a força responsável pelo abaixamento do braço da balança ou pelo valor indicado no visor da balança digital.

O material a ser utilizado para a realização da atividade proposta compõe-se de uma balança de comparação, dois recipientes de aproximadamente 200 mL (transparentes), tripé, haste, corpo de prova (de preferência que possua um formato geométrico de volume conhecido (pode ser um cilindro de metal de alumínio), barbante e massas previamente aferidas.

Colocam-se os dois recipientes com

água cada um sobre cada braço da balança e assegura-se o equilíbrio da mesma regulando a quantidade de água em cada recipiente. Deixa-se o corpo de prova suspenso acima do nível do líquido como mostram as Figs. 1 e 2. Neste momento, há um conjunto de questões a serem formuladas para os estudantes pensarem e discutirem em grupo. O que a balança demonstrará quando o corpo for imerso no líquido em um dos recipientes sem tocar o fundo? A balança indicará alguma alteração? Caso a opção escolhida seja a de descida ou de subida de um dos braços, qual será o lado que irá se deslocar para baixo? Qual a força responsável por esta descida? Podemos calcular o valor desta força? De que maneira?

Nos cursos introdutórios de física no ensino superior, percebemos que a maioria dos estudantes responde que não haverá desnivelamento da balança se o objeto não tocar o fundo do recipiente. Após mergulhar o corpo em um dos recipientes, sem tocar o fundo, verifica-se o movimento descendente do braço em que é inserido o corpo na água (Fig. 2). Perguntamos qual é a força que é responsável por este efeito, e muitos respondem que é o empuxo. Este é o momento de ser melhor “trabalhada” a terceira lei de Newton, pois o empuxo é a força que age sobre o corpo, logo o aluno é convencido de que é a reação ao empuxo que age

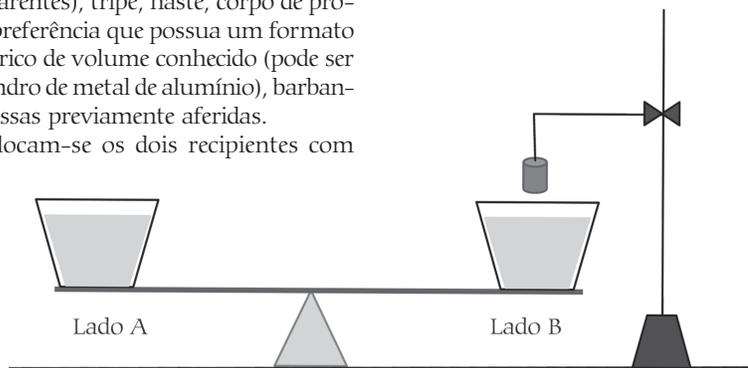


Figura 1. Diagrama esquemático da atividade proposta.

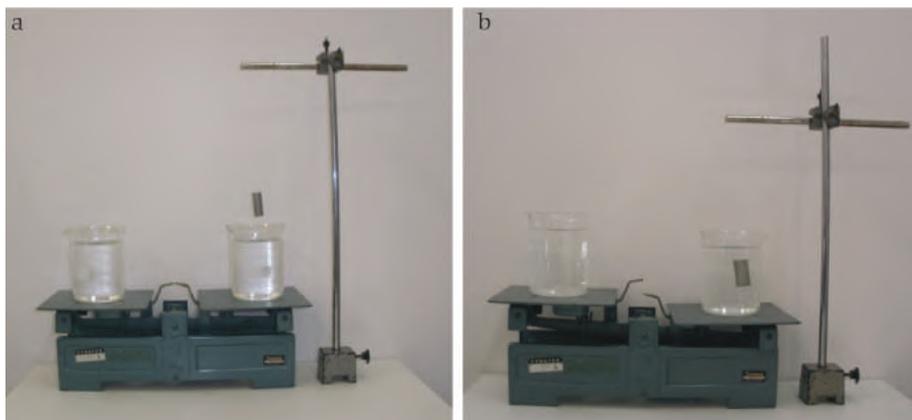


Figura 2. a - Preparação do conjunto para o processo de questionamento aos estudantes. b - Balança de comparação acusando a existência de uma força para baixo no braço da direita quando da imersão do corpo no líquido. O objeto a ser imerso no líquido é o mesmo nas duas imagens, que é um cilindro de alumínio.

sobre o líquido e que por pares de ação e reação é transmitido ao fundo da balança, provocando o desequilíbrio. Notamos que a dúvida começa a ser diluída quando os estudantes colocam os vetores das forças atuantes no corpo de prova e no líquido onde o corpo foi mergulhado. Na Fig. 3 são indicadas nominalmente as forças atuantes em cada um dos integrantes mencionados anteriormente e também na forma de vetores.

Para medir o valor da força responsável por este desequilíbrio, massas aferidas podem ser colocadas sobre o braço da balança que subiu até que o sistema volte ao equilíbrio. Se o valor das massas aferidas for multiplicado pelo valor da “aceleração da gravidade” (g), obtemos que a força que desequilibra a balança será o valor do peso do fluido deslocado (princípio de

Arquimedes).

Os estudantes podem medir o volume do corpo de prova e a multiplicação do valor obtido pelo valor da densidade da água e pelo valor da aceleração gravitacional resulta no valor que numericamente é igual ao peso do líquido do volume deslocado pelo corpo. Para fins de exemplificação, tomamos o cilindro de alumínio como o corpo de prova, ilustrado na Fig. 2. A massa do mesmo é de 21,12 g, com 15,8 mm de diâmetro e 40 mm de altura. O empuxo é calculado como

$$E = m_{\text{líquido}}g = \rho_{\text{líquido}} V_{\text{corpo}}g = 1,0 \times 10^3 \times 3,14 \times (7,9 \times 10^{-3})^2 \times 0,040 \times 9,8 = 0,077 \text{ N}.$$

Este é o mesmo valor da intensidade da força que faz com que o braço da balança desça.

Adicionalmente, o empuxo também pode ser obtido através da utilização de um dinamômetro. Medindo-se o peso do corpo no ar e quando imerso no líquido (comumente

chamado de seu peso aparente) e efetuando-se a diferença entre eles, temos que

$$E = P_{\text{no ar}} - P_{\text{aparente}} = 0,207 - 0,130 = 0,077 \text{ N}$$

Na falta de uma balança de comparação, esta atividade pode também ser realizada com uma balança eletrônica digital, como mostra a Fig. 4. No caso da balança digital, para saber o valor da intensidade da força é só multiplicar o valor da massa indicada no visor com o valor da aceleração gravitacional. Como podemos ver na figura, o valor que a balança digital apresenta é de 7,86 g indicando que o valor da intensidade da força para baixo é de $7,86 \times 10^{-3} \text{ kg} \times 9,8 \text{ m/s}^2$, ou seja, de 0,077 N, que corresponde ao valor numérico do empuxo, que é o mesmo valor da reação ao empuxo que age sobre o líquido.

Sugestão e conclusão

No caso desta atividade ser trabalhada no primeiro ano do Ensino Médio sem o conhecimento do que seja empuxo, o professor pode realizar o experimento sem o tratamento quantitativo. Neste caso, o professor poderá explicar aos estudantes que o empuxo é a força com sentido para cima que atua nos corpos imersos total ou parcialmente em um fluido em equilíbrio (e sob a ação da gravidade) e que faz com estes pareçam ser mais leves do que quando suspensos no ar. A atividade experimental descrita neste trabalho tem sido um facilitador para os autores no ensino e aprendizagem da terceira lei de Newton.

Bibliografia

- Higino Santo Damo, *Física Experimental I* (EDUCS, Caxias do Sul, 1985).
- D. Halliday, R. Resnick e J. Walker, *Fundamentos de Física 1 – Mecânica*. (LTC, Rio de Janeiro, 2008).
- A. Máximo e B. Alvarenga, *Curso de Física* (Scipione, São Paulo, 2011).

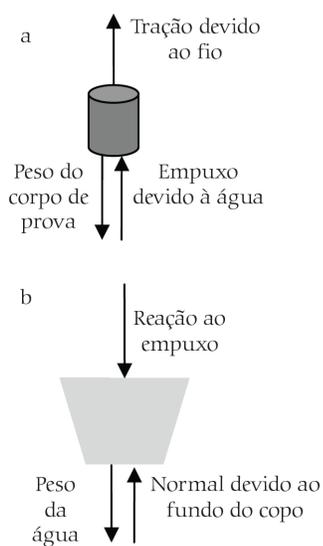


Figura 3. a - Diagrama de forças sobre o corpo mergulhado na água. b - Diagrama de forças sobre a água contida no recipiente.

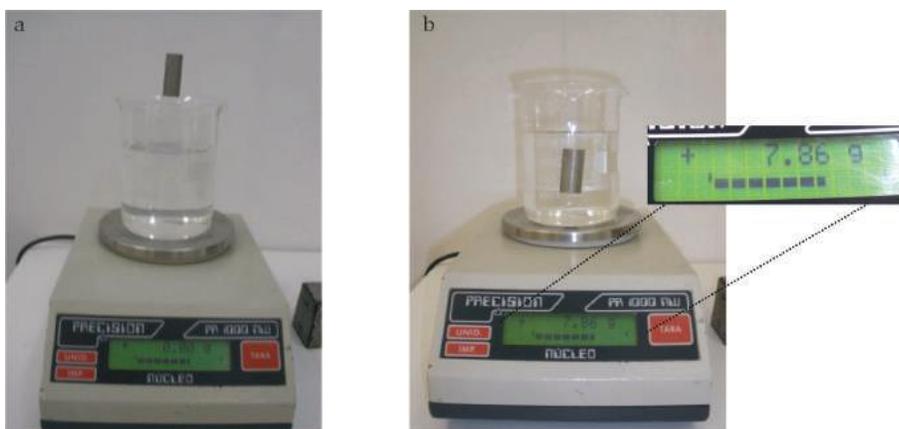


Figura 4. a - Utilização de uma balança eletrônica digital mostrando o fenômeno antes da imersão do corpo no líquido (valor da massa zerado). b - Depois da imersão sem tocar no fundo do recipiente, com um aumento da região do visor para melhor visualização.



.....
D.M. Oliveira
NASA Goddard Space Flight Center,
Greenbelt MD, USA
Goddard Planetary Heliophysics
Institute, University of Maryland
Baltimore County, Baltimore, MD USA
E-mail: denny.m.deoliveira@nasa.gov

.....
A.S. Emygdio
Colégio Exatus, São Paulo, SP, Brasil
Instituto de Física, Universidade de São
Paulo, São Paulo, SP, Brasil
E-mail: alexandre.emygdio@usp.br
.....

O livro *Perdido em Marte* [1] (*The Martian*, título original em inglês), escrito por Andy Weir, tem causado intenso alvoroço que vai além do meio literário. Mark Waltney é um astronauta da NASA que faz parte da tripulação de uma missão destinada a explorar o planeta Marte. Waltney é deixado para trás por seus companheiros após um grave acidente provocado por uma intensa tempestade de areia no planeta vermelho. A história de Waltney e de sua luta por sobrevivência ganhou vida nas telas do cinema em outubro de 2015.

Weir cresceu lendo livros de ficção científica escritos, por exemplo, por Arthur C. Clarke e Isaac Asimov. Aos 15 anos, conseguiu emprego como programador em uma agência de pesquisa do governo americano ligada ao departamento de energia. Ele começou a escrever histórias de ficção científica no início de seus 20 anos. Apesar de escrever alguns trabalhos sem nenhum sucesso considerável, Weir teve a ideia de escrever *Perdido em Marte* em 2009. Ele tornou alguns capítulos de seu livro acessíveis em seu *blog* sem nenhum custo aos leitores, e alguns deles se encantaram com a obra, pedindo que Weir a lançasse em versão *ebook*, o que a tornaria disponível para *download*. Não demorou muito para uma editora comprar os direitos do livro e introduzi-lo no mercado literário. Em pouco tempo a obra tornou-se um *best-seller* nos Estados Unidos. Tal sucesso levou a indústria cinematográfica americana a dar vida à história do astronauta Mark Waltney no cinema.

A história se inicia quando Mark Waltney acorda depois de sofrer um grave acidente causado por uma tempestade de

areia em Marte. A tripulação da NASA ficaria em Marte por aproximadamente 30 dias. O resto da tripulação tinha concluído que Waltney havia sucumbido à tempestade e deixaram o planeta imediatamente. Depois de chegar ao *Hab* (o abrigo), ele percebeu que sua sobrevivência dependeria de suas habilidades técnicas e científicas não somente de imediato, mas também a longo prazo. Waltney considerou a possibilidade de ser resgatado pela missão *Ares 4* (ele fazia parte da missão *Ares 3*). Seu problema maior seria sobreviver em um ambiente totalmente inóspito a qualquer tipo de vida pelos próximos 4 anos até seu eventual socorro chegar ao planeta vermelho.

A originalidade de Weir fica evidente ao se analisar as condições de seu personagem desse ponto de vista. Weir realizou uma extensa pesquisa científica para que a história ficasse, segundo suas palavras, “o mais cientificamente correto possível”. Waltney, assim como os outros tripulantes

Perdido em Marte é um romance que mostra como Mark Waltney, astronauta da NASA em missão exploratória a Marte, luta pela sobrevivência após ser inadvertidamente deixado para trás por seus companheiros de missão

de *Ares 3*, possui duas qualificações. Ele é engenheiro mecânico e botânico com pós-graduações. Assim, o astronauta tenta utilizar ao máximo suas especialidades na batalha diária de simplesmente permanecer vivo. Uma das tarefas na missão de Waltney era observar como as plantas se desenvolveriam ali; no entanto, as únicas sementes que possuía eram de espécies mais resistentes e de fácil desenvolvimento como as de gramas e samambaias. Vasculhando os mantimentos do *Hab*, Waltney descobre diversos vegetais que poderia plantar e, dentre eles, a melhor opção para produzir conteúdo calórico para sua sobrevivência eram batatas. Batatas crescem profusamente e cada uma poderia ser dividida em pedaços com olhos

Deixado acidentalmente para trás em uma missão de exploração do planeta Marte, o astronauta da NASA, Mark Waltney, articula seus conhecimentos para o enfrentamento de situações-problema. Utilizando criatividade e pragmatismo o livro de Andy Weir permite, em uma linguagem simples e de fácil compreensão, que o público, em especial o jovem estudante, valorize as múltiplas áreas do conhecimento científico. O livro *Perdido em Marte* inaugura um novo seguimento literário denominado de *nerd thriller*.

germinativos, multiplicando ainda mais a sua produtividade e prolongando sua reserva de alimento em uma escala de tempo de 4 anos. Ele calcula quantas batatas, em função de suas calorias, ele precisa consumir por dia e cultivar nesse período de tempo. O astronauta faz vários cálculos quase o tempo todo, e o leitor inevitavelmente faz as contas juntamente com Waltney. Para cultivar batatas, o astronauta precisa de água, algo não encontrado em Marte.¹ Waltney decide então fabricar água em Marte. Com seus conhecimentos de química ele queima hidrazina, um composto químico altamente inflamável, para produzir água. Suas aptidões em engenharia mecânica são frequentemente empregados em tarefas relacionadas a adaptações de equipamentos e veículos levados pelos astronautas ao planeta vermelho. Um ponto marcante do livro corresponde ao fato de que Waltney, quando encontra a solução para um determinado problema, geralmente causa um outro problema. Para tentar aliviar a sensação de solidão e desesperança, o astronauta escreve suas tarefas diárias em um *log* (uma espécie de diário) no qual cada entrada é denominada Sol, ou dia solar. Um Sol correspondente a 24 horas e 39 minutos em Marte. Sol 1 corresponde então ao primeiro dia da tripulação em Marte. O restante da tripulação partiu do planeta vermelho em Sol 6. O astronauta também se utiliza de seu bom humor na tentativa de superar suas dificuldades.

“Sou o melhor engenheiro mecânico em Marte e portanto tenho que resolver esse problema”, diz Waltney em uma ocasião.

Outros conhecimentos técnicos e científicos são utilizados pelo astronauta solitário. Devido ao fato de estar incomunicável, Waltney viaja com um dos veículos ao local onde a sonda *Pathfinder* perdeu contato com a Terra em 1997. Uma bússola, mesmo se estivesse disponível, não funcionaria, pois, segundo Waltney explica em seu *log*, Marte não tem um campo magnético próprio. Para contornar essa situação, o astronauta utiliza conceitos de astronomia de posição para determinar sua localização em solo marciano. Waltney descreve que seu instrumento de navegação mais importante é o satélite natural marciano Fobos, que cruza o horizonte pelo menos duas vezes por Sol. Ao retornar ao *Hab*, Waltney trabalha na sonda usando seus conhecimentos de eletrônica, e consegue restabelecer contato com a Terra. Entretanto, o sistema operacional de *Pathfinder* é obsoleto, pois a sonda fora concebida quase 20 anos antes. Para iniciar uma comunicação com a NASA, Waltney dispunha da plataforma da câmera como parte móvel para transmissão de informações através de bilhetes. Como existiam algumas possíveis restrições físicas para escrever com caneta fora da nave e limitação de papel, Waltney resolve utilizar o código ASCII. Seu objetivo é transmitir pares de dígitos hexadecimais, então prepara cartões de 0

a 9 e de A a F, além de um cartão de pergunta, totalizando dezessete cartões em volta da câmera. A câmera se encontrava no centro e podia girar 360°, isso permitia mais de 21° de precisão entre dois cartões consecutivos para que não provocasse dúvidas em qual cartão ela estaria apontando.

Para otimizar ainda mais sua comunicação com a NASA, Waltney atualiza o sistema operacional da sonda utilizando um código escrito na linguagem computacional FORTRAN. Para realizar essa tarefa (programação não é uma de suas melhores habilidades), Waltney necessita da ajuda de técnicos da NASA para compilar o código e tornar *Pathfinder* novamente e efetivamente operacional. Ele realiza esta tarefa com sucesso.

Há alguns pontos no livro que não são necessariamente cientificamente apurados. Por exemplo, não se sabe se a realização de um EVA (do inglês *Extravehicular Activity*) seria seguro devido à radiação solar intensa que chega ao solo marciano (veja comparação entre Marte e a Terra segundo o próprio Waltney). O *Hab* deveria portanto ser enterrado. A pressão atmosférica em Marte corresponde a menos de 1% a da Terra. Temperaturas na superfície de Marte variam amplamente, mas geralmente são muito baixas. Entretanto, o astronauta encontrou uma solução inusitada a esse problema principalmente em suas viagens por terra e perante a ideia de tomar um banho em



Figura 1. Cena do filme *Perdido em Marte*, estrelado pelo ator Matt Damon como Mark Waltney, um astronauta da NASA. Waltney contempla a vastidão do vazio após ser abandonado no planeta vermelho. Crédito da imagem: 20th Century Fox.



Figura 2. Waltney e o sistema de comunicação com a NASA durante seu isolamento em Marte. Crédito da imagem: 20th Century Fox.

uma banheira de água quente. Ele utilizou um recipiente com uma substância altamente radioativa como fonte de calor.

Apesar de alguns pontos negativos, o balanço geral do livro é positivo. A necessidade de conhecimento técnico e científico e suas aplicações efetivas a problemas críticos é a marca registrada do livro. Essa é a principal mensagem de Weir: os conhecimentos técnicos e científicos fazem cada vez mais parte da vida cotidiana de pessoas comuns. Com base nesse argumento, os autores fortemente sugerem que professores de ciências em geral e professores do Ensino Médio recomendem a leitura desse livro a seus alunos, muito

embora a situação vivida pelo astronauta Waltney dificilmente seria enfrentada por alguém na Terra. Escrito em linguagem simples, sem nenhuma fórmula matemática, embora repleto de raciocínios lógicos não-triviais, o livro apresenta conhecimentos científicos interessantes e de fácil compreensão por não-cientistas e estudantes em geral.

Para finalizar, gostaríamos de salientar que Andy Weir inaugura, com *Perdido em Marte*, um novo segmento literário, o *nerd thriller*. Nós esperamos que o futuro traga muitas obras semelhantes a esta, o que certamente enriquecerá o conhecimento de ciências dos jovens estudantes.

Como resultado, a importância e aplicabilidade desse conhecimento à nossa complexa sociedade contemporânea será melhor compreendida.

Comentário dos autores

A leitura da tradução em português é acessível e de fácil compreensão ao público adolescente, das últimas séries do Ensino Fundamental II em diante. A escrita simples sem muitos termos técnicos permite que as diferentes linguagens abordadas no livro e no filme, como a matemática, a biologia, a química e a física se apresentem como ferramentas para a articulação de mecanismos de estímulo ao aprendizado do estudante. Eixos cognitivos comuns a todas as áreas do conhecimento, como por exemplo o enfrentamento de situações-problema, ampliam a criatividade e o pragmatismo em soluções que muitas vezes passam despercebidas.

Nota

¹Curiosamente, a NASA (agência espacial norte-americana) anunciou a presença de água altamente salinizada no planeta vermelho enquanto os autores escreviam esse texto.

Referência

[1] A. Weir, *Perdido em Marte* (Editora Arqueiro, Rio de Janeiro, Brasil).

Obras selecionadas – Serie MNPEF

Os livros da Série MNPEF são distribuídos gratuitamente aos professores que frequentam os cursos de pós-graduação em qualquer um dos 60 polos distribuídos pelo país.

Mecânica Quântica: Um Curso para Professores de Física

Autora: Silvana Perez

Instituição: Universidade Federal do Pará

O livro é voltado para licenciados e licenciandos do curso de física. Está cuidadosamente dividido entre formalismo matemático e a discussão conceitual. O que o difere dos textos utilizados em geral, excessivamente preocupados com a abstração matemática.

Física e Música

Autores: Maria Lúcia Grillo, Luiz Roberto Perez, Luiz Pugginelli Brandão, Diones Luiz Gramelicky, Vanessa Rodrigues da Conceição, José Antônio de Azevedo Crespo

Instituição: Universidade Estadual do Rio de Janeiro

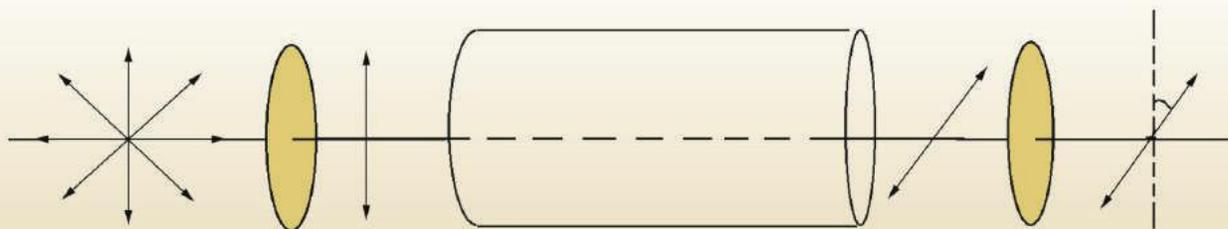
Esta obra apresenta de forma interdisciplinar e contextualizada os fundamentos da acústica, relacionados com a história e a música e ainda, propostas de transposições didáticas da acústica teórica e experimental para nível médio..



$$1/[L \cdot (M/L^3)] =$$

O ensino da análise dimensional

$$1/[M/L^2] = L^2 \cdot M^{-1}$$



Fábio W.O. da Silva

Centro Federal de Educação
Tecnológica de Minas Gerais, Belo
Horizonte, MG, Brasil
E-mail: fabiowdfm@yahoo.com.br

Introdução

A análise dimensional já foi um conteúdo muito explorado no ensino de física, sobretudo quando se adotava uma visão de ensino axiomático-dedutivo. As inovações pedagógicas ocorridas nas últimas décadas fizeram com que o tema gradualmente perdesse espaço, chegando a ser completamente eliminado dos principais livros-texto, do Ensino Médio à universidade. Sem desprezecer as valiosas contribuições trazidas pelas novas metodologias de ensino, os equívocos encontrados em um relatório recente, produzido por dois doutores em química orgânica, sugerem a conveniência de se voltar a conferir maior atenção a esse tema.

Um dos princípios básicos da análise dimensional é a homogeneidade, segundo o qual os dois membros de uma equação que exprima uma lei física ou descreva um processo físico devem ser homogêneos em relação a cada grandeza de base. Por isso, a análise dimensional é usada habitualmente como uma técnica heurística para obtenção de equações que representam leis científicas, fornecendo indicações sobre os parâmetros que supostamente influenciam um fenômeno específico. Um aspecto menos explorado, mas nem por isso menos relevante, é que a validade desse resultado depende das unidades de medida. Portanto, as unidades podem ser escolhidas arbitrariamente, definindo-se então de forma conveniente as constantes de proporcionalidade.

O tema do relatório que despertou a atenção é uma técnica tradicional para determinação da concentração de soluções de substâncias opticamente ativas, ou seja,

que possuem a propriedade de girar o plano de polarização da luz para a esquerda (-) ou para a direita (+). A medida é realizada por meio de um polarímetro, mostrado esquematicamente na Fig. 1. A luz fornecida pela fonte à esquerda é polarizada pelo primeiro filtro, penetra no tubo com a solução e o plano de polarização é girado à medida que atravessa o tubo. O ângulo total de giro (α) é determinado por meio do filtro analisador e depende do número de moléculas opticamente ativas encontradas ao longo da trajetória. Portanto, α é uma função do comprimento total de solução atravessada pela luz (L) e da concentração da substância (c).

Para que as rotações sejam medidas em uma base padrão, habitualmente recorre-se a uma grandeza denominada *rotação específica* ou *poder rotatório*, $[\alpha]$. A rotação específica é característica de cada substância e pode ser determinada experimentalmente por

$$[\alpha] = \frac{\alpha}{L \cdot c}$$

em que α é a rotação observada, L é o comprimento do tubo que contém a solução e c é a concentração da solução. Dessa forma, conhecendo-se $[\alpha]$, L e c , é possível

prever a rotação do plano de polarização de um feixe de luz ao atravessar a solução. Além disso, como a rotação específica depende da temperatura (T) e do comprimento de onda da luz (λ),

essas condições devem ser explicitadas. Por exemplo, $[\alpha]_D^{25}$ significa que a medida foi realizada a 25 °C, usando-se a linha D de uma lâmpada de sódio ($\lambda = 589,6$ nm).

A convenção usual da área estabelece que os parâmetros na equação da rotação sejam expressos nas seguintes unidades:

Um dos princípios básicos da análise dimensional é a homogeneidade, segundo o qual os dois membros de uma equação que exprima uma lei física devem ser homogêneos em relação a cada grandeza de base

Neste trabalho, sugere-se dar maior ênfase à análise dimensional no ensino de física. Partindo de um caso real, em que um erro foi cometido por deficiência desse conteúdo, procura-se analisar esse erro com base no conceito de dimensão, na diferença entre grandezas fundamentais e grandezas derivadas, equações empíricas e resultados experimentais.

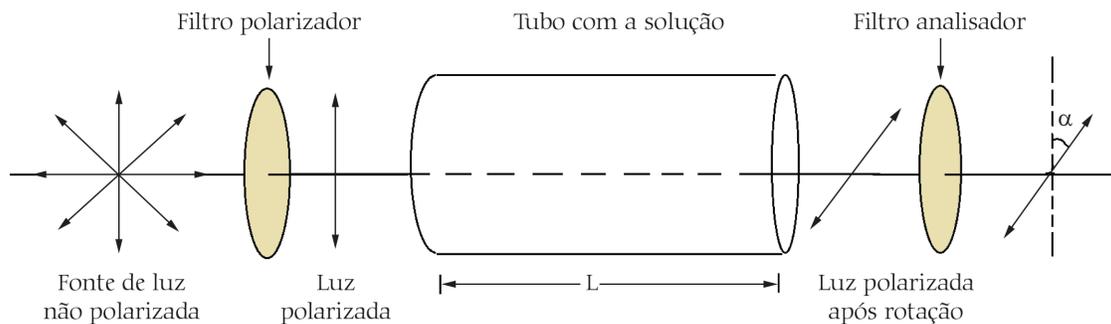


Figura 1 – O polarímetro.

α em graus, L em decímetros e c em gramas por mililitro de solução [1-3]. Por exemplo, se o plano da luz for girado de $\alpha = +0,10^\circ$, após atravessar 10 cm de uma solução que contenha 1,0 g da substância em 40 mL de solvente, a rotação específica será: $[\alpha] = +0,10^\circ / (1,0 \text{ dm} \cdot 0,025 \text{ g/mL}) = +4,0^\circ / (\text{dm} \cdot \text{g/mL})$. Habitualmente os manuais omitem a unidade de $[\alpha]$, já que se trata de um padrão [2], e representam apenas $[\alpha] = +4,0^\circ$.

● problema

O relatório discute a resposta a um problema mal formulado, para o qual se deve calcular $[\alpha]$ com base nos seguintes dados: $\alpha = -2,5^\circ$; $L = 10 \text{ cm}$; $c = 1,0 \text{ g}$ de uma substância opticamente ativa em 20 mL de solução. Seguindo o procedimento padrão [1], obtém-se $[\alpha]_D = -2,5^\circ / [(1,0 \text{ dm}) \cdot (0,050 \text{ g/mL})] = -50^\circ / (\text{dm} \cdot \text{g/mL})$, ou simplesmente $[\alpha] = -50^\circ$. Os autores contestam essa resposta, afirmando textualmente que “ela explicitou no cálculo principal apenas a unidade do comprimento da célula em dm e colocou a concentração em g/mL, ou seja, não há compatibilidade entre as unidades usadas (mL e dm) e o valor gerado está errado. Na verdade, o cálculo correto (em cm) seria: $[\alpha]_D = \alpha / (c \cdot L) = -2,5^\circ / (1 \text{ g}/20 \text{ cm}^3) \times 10 \text{ cm} = -50^\circ$ ”.

Entre os dois procedimentos, há uma diferença de uma ordem de grandeza. Qual deles está correto? Onde está o erro? Procedem as referidas alegações?

A análise dessas questões, desenvolvida a seguir, comentará três aspectos:

1) A razão entre grau ($^\circ$) e [(grama/centímetro cúbico) \cdot centímetro] não é dimensional ($^\circ$), mas [grau \cdot (cm^2/g)].

2) O relatório não considerou a presença da constante de proporcionalidade.

3) A mudança de unidades não altera a homogeneidade de uma equação (aparentemente, a *compatibilidade* à qual se refere o texto).

O primeiro aspecto é evidente por si mesmo, basta explicitar todas as unidades, como foi feito, e verificar que não se obtém o resultado em graus, como foi afirmado. Uma interpretação para a linha de raciocínio daqueles autores seria a hipótese de que, se o comprimento L estivesse em cm e a concentração c em g/cm^3 , a unidade cm poderia ser “simplificada” com a unidade cm^3 , o que não seria factível se as unidades fossem dm e g/mL , respectivamente. Provavelmente, resultaria daí a suposta “incompatibilidade”.

Quanto ao segundo aspecto, é conveniente esclarecer que as constantes de proporcionalidade estão presentes em todas as equações físicas. Por exemplo, considere-se a força gravitacional entre duas partículas de massas m_1 e m_2 , separadas pela distância r . De acordo com a teoria da gravitação de Newton, essa força é diretamente proporcional ao produto das massas e inversamente proporcional ao quadrado da distância que

as separa: $F \propto (m_1 \cdot m_2)/r^2$. Entretanto, usando-se o sistema internacional de unidades (SI), duas massas de 1 quilograma separadas por 1 metro não se atraem com a intensidade de 1 newton. Falta na expressão uma constante de proporcionalidade (G), com um valor numérico a ser determinado experimentalmente: $F = G (m_1 \cdot m_2)/r^2$.

O fator G poderia até ser unitário, bastaria redefinir a unidade de força (newton, por que não?) a partir dos valores das outras grandezas envolvidas, ou seja, se 1 newton fosse igual à intensidade da força gravitacional produzida por duas partículas de 1 kg distantes 1 m uma da outra. Ainda assim, contudo, faltaria

atribuir a essa constante uma unidade. Adotando-se mais uma vez o SI, o produto das unidades do segundo membro, sem levar em conta G , forneceria kg^2/m^2 , que não corresponde a uma força ($\text{N} = \text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2$). Portanto, a unidade de G seria $\text{N} (\text{m}^2/\text{kg}^2) = (\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2) \cdot (\text{m}^2/\text{kg}^2) = \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$. Se as unidades de massa, distância e força fossem outras, o valor de G seria automaticamente modificado, mesmo assim a unidade de G deveria conter (unidade de massa \times unidade de distância) $^{-1}$ (unidade de tempo) $^{-2}$. Em outras palavras, a dimensão de G seria conservada, o que remete à discussão da análise dimensional.

● conceito de dimensão

O termo *dimensão* tem origem na geometria euclidiana, em que são admitidos apenas valores inteiros: uma reta tem dimensão 1, um plano tem dimensão 2 e o espaço tem dimensão 3. A extensão à física exigiu adequações, pois não se resume a associar um expoente a uma grandeza, mas trata-se de expressar a natureza dessa grandeza. A história remonta pelo menos ao Século XVIII [4]. O trabalho mais antigo nessa área é atribuído a François Daviet de Foncenex (1734-1799) e foi publicado em 1761 [5], com o objetivo de estabelecer *a priori* as leis fundamentais da mecânica. Mais especificamente, ele buscava um método para: (1) demonstrar de maneira exata e rigorosa os princípios fundamentais da mecânica, que seriam a lei da inércia, da composição de forças (ou do paralelogramo) e do equilíbrio; (2) responder à pergunta se as leis da mecânica seriam verdades necessárias ou contingentes. Se obtivesse êxito em fundar as leis da mecânica sobre considerações puramente arbitrarias e intelectuais, elas conteriam uma verdade tão necessária quanto as proposições da geometria (euclidiana).

Foncenex não explicita o conceito de dimensão que utiliza, mas é possível apreendê-lo em seu trabalho. Para demonstrar a lei da composição de forças, considera inicialmente que a resultante (R) de duas

Se obtivesse êxito em fundar as leis da mecânica sobre considerações puramente arbitrarias e intelectuais, elas conteriam uma verdade tão necessária quanto as proposições da geometria

forças só pode depender das forças componentes (F) e do ângulo entre elas (ϕ), ou seja, $R = \text{função}(F, \phi)$. Como a força R possui a mesma natureza das forças F , R deve conter o mesmo número de dimensões de F , pois a dimensão de ϕ é nula: $R = \text{função}(F, \phi) = F \cdot \text{função} \phi$. A argumentação de Foncenex refere-se ao que hoje denomina-se *homogeneidade dimensional*, ou seja, os dois membros da equação devem possuir a mesma natureza, objeto da análise dimensional.

Em uma nota de rodapé [5, p. 306], Foncenex afirma que, por esse método, poderia demonstrar de forma direta e natural diversos teoremas sobre a proporcionalidade dos lados das figuras, e um grande número de outras proposições da geometria e da mecânica. Isso refletia o contexto de ciência da época, dominado pela mecânica newtoniana e pela geometria euclidiana, marcado por uma grande expectativa quanto à possibilidade de um conhecimento fundamental *a priori*. Desde então, diversos pesquisadores contribuíram para o desenvolvimento da área, entre eles, Fourier e Poisson.

Atualmente, esse tipo de análise conserva sua utilidade, apesar de ligada a objetivos menos ambiciosos. Como método heurístico, são importantes as aplicações baseadas no teorema π de Buckingham [6]. De modo geral, trata-se de um conteúdo imprescindível à educação científica dos estudantes, capaz de orientá-los em diversas situações.

A análise dimensional

As grandezas físicas não são todas independentes umas das outras. Por exemplo, representando-se a dimensão do deslocamento por L (comprimento, do francês *longueur*) e do tempo por T (tempo, do francês *temps*), a dimensão da velocidade ficará automaticamente determinada: $L/T = LT^{-1}$ [7]. Assim, partindo de um pequeno conjunto de grandezas, consideradas fundamentais, é possível determinar a dimensão de qualquer grandeza derivada. Atualmente, são consideradas fundamentais as seguintes grandezas [8], com os respectivos símbolos de dimensão: comprimento (L), tempo (T), massa (M), corrente elétrica (I), temperatura termodinâmica (θ), quantidade de matéria (N), intensidade luminosa (J).

Independentemente das unidades empregadas para representar essas grandezas, a natureza dimensional dos membros de uma equação permanece inalterada. Se os autores do relatório em pauta soubessem disso, perceberiam que, ao substituírem as unidades de comprimento da célula, usando centímetro em lugar de

decímetro; e de volume, usando centímetro cúbico em lugar de mililitro, multiplicariam o resultado por uma potência de dez ($1 \text{ cm} = 10^{-1} \text{ dm}$), sem modificar sua natureza dimensional, ou seja, o resultado do cálculo teria sempre a mesma dimensão: ângulo (adimensional)/[comprimento(L) . massa (M)/volume (L^3)] = $1/[L \cdot (M/L^3)] = 1/[M/L^2] = L^2 \cdot M^{-1}$. Portanto, está implícita na equação uma constante de proporcionalidade, necessária ao estabelecimento da homogeneidade entre seus dois membros.

O resultado desse cálculo não possui dimensão de ângulo (adimensional), nem de ângulo por comprimento (L^{-1}), quaisquer que fossem as unidades usadas, mas de comprimento²/massa. Na análise, não se fez nenhuma referência às unidades de medida, nem a um sistema específico, apenas à natureza das grandezas envolvidas. A dimensão de uma grandeza não se altera com a mudança das unidades usadas para expressá-la. Em termos da geometria, que inspirou esse tipo de consideração, seria o equivalente a afirmar que a área de um retângulo possuirá sempre a dimensão dois (R^2), esteja o comprimento dos lados em metros, centímetros, polegadas, jardas ou côvados. A dimensão 2 não é função da unidade empregada, mas expressa a natureza da superfície no espaço euclidiano. É uma ingenuidade acreditar que uma alteração de unidade de medida, por exemplo, de centímetro para metro, pudesse converter R^2 em R ou R^3 .

Equações empíricas e resultados experimentais

Em ciência, algumas equações são obtidas a partir de outras equações mais fundamentais ou a partir de primeiros princípios por meio de operações matemáticas. É o caso de obter a aceleração de uma partícula derivando-se a expressão da velocidade em relação ao tempo, $a = dv/dt$. Por exemplo, considere-se $v = 2t$, em que a velocidade é diretamente proporcional ao tempo. Derivando-se v em relação ao tempo, obtém-se: $a = 2$. Há uma constante implícita nessas expressões (k), de dimensão L/T^2 , que assegura sua homogeneidade: $v = 2 [k] t$, que também faz com que a aceleração resultante apareça com a dimensão correta.

Em pesquisa experimental, é muito frequente o recurso a equações fenomenológicas, ou empíricas, criadas para correlacionar dados de laboratório. Nesse caso, a grandeza obtida é expressa em ter-

mos das grandezas consideradas relevantes para a modelagem do sistema, geralmente nas unidades mais convenientes para o experimentador. Um caso muito conhecido é a equação de Rydberg, que descreve as linhas espectrais de emissão do hidrogênio, $1/\lambda = R_H(1/n_1^2 - 1/n_2^2)$, em que λ é o comprimento de onda da luz emitida, R_H é a constante de Rydberg e n_1/n_2 são números inteiros, tal que $n_1 < n_2$. A constante R_H depende da unidade de λ . Alguns autores preferem expressar λ em metros, outros em nanômetros (10^{-9} m) ou em angstroms ($\text{Å} = 10^{-10} \text{ m}$), uma unidade mais usual entre os espectroscopistas. A constante R_H deverá ser compatível com essa opção.

Um experimento comum em laboratórios de ensino de física trata da relação entre a deformação de uma mola e a intensidade da força restauradora. Para pequenas deformações, a força restau-

radora é proporcional à deformação (lei de Hooke). Suponha-se que, ao medir a força em newtons (N) e a deformação em centímetros (cm), tenha sido estabelecida a relação $F = 20x$. Isso não significa que a força possui unidade de comprimento (x), pois, embutido no fator multiplicativo 20, usualmente denominado *constante elástica da mola*, ou simplesmente *constante da mola*, há um fator de proporcionalidade expresso em N/cm .

A equação para a rotação do plano de polarização da luz pertence a essa última categoria. Em 1860, o físico Jean-Baptiste Biot (1774-1862) publicou uma síntese de seus trabalhos intitulada *Introdução às Pesquisas Sobre Mecânica Química*, em que revê "o conjunto desses fenômenos singulares, que foram para mim objeto de estudos perseverantes durante mais de quarenta anos" [9, p. 2]. Esses fenômenos singulares aos quais ele se refere estão ligados à propriedade de algumas soluções de desviarem o plano de polarização da luz. Ele chama a atenção dos químicos para numerosos casos de combinações moleculares em proporções que podem variar continuamente nos meios líquidos, de maneira invisível, sem que qualquer dos componentes se separe do conjunto. Entretanto, apesar de invisíveis, esses componentes podem ser medidos por meio da técnica descrita.

Biot não era arrogante, já de início reconheceu que foi "o acaso, esse grande promotor das descobertas físicas", que o levou a perceber o fenômeno em 1815, em experimentos que tinham um objetivo

Independentemente das unidades empregadas para representar essas grandezas, a natureza dimensional dos membros de uma equação permanece inalterada

completamente diverso. Em seguida, ele explicou a montagem, a mesma que aparece esquematizada nos livros atuais sobre o tema, e apresentou a famosa equação:

$$[\alpha] = \frac{\alpha}{L \cdot \varepsilon \cdot \delta}$$

em que denominou $[\alpha]$ de *poder rotatório molecular dos corpos*; α , a rotação observada; L , o comprimento do tubo, inicialmente em milímetros; ε , a fração do sistema misto e δ , a concentração efetiva da solução. No caso de um meio inteiramente composto pela substância ativa, tem-se $\varepsilon = 1$ e $[\alpha] = \alpha/(L \cdot \delta)$.

Ainda nesse trabalho, o descobridor do fenômeno e criador da equação esclareceu [9, p. 7]:

Nas aplicações, para não ter que operar com frações muito pequenas, multipliquei habitualmente o valor numérico de $[\alpha]$ por 100. Sob essa forma, eu o denominei de *poder rotatório por 100 milímetros*. Então, quando desejamos aplicar a expressão com essa modificação, para obter os desvios α por um cálculo inverso, é necessário, em compensação, expressar L em decímetro, e não mais em milímetro, por unidade de comprimento.

Assim, a prática de expressar o comprimento do tubo em decímetros, e não em milímetros ou centímetros, possui uma tradição de mais de 200 anos e foi motivada por uma conveniência experimental. Essa é a forma consagrada da equação, estabelecida por seu criador, o

físico Jean-Baptiste Biot, e respeitada pela maioria dos autores. Atualmente, ao referir-se ao poder rotatório específico, fica implícito que se trata de poder rotatório por decímetro, e o comprimento do tubo deve ser expresso em decímetros. Essa é a tradição da área, motivada por uma conveniência experimental, mas que não prejudica a homogeneidade da equação, como foi demonstrado na seção anterior.

Este exemplo ilustra um caso em que a história da ciência pode contribuir para compreender a origem de práticas consagradas e evitar equívocos elementares. Parece também corroborar a opinião de Moreira [10], segundo a qual o ensino de física não deve ser pautado por um único enfoque, pois, se cada vertente de ensino tem seu valor, possui também suas limitações. Portanto, a construção do conhecimento a partir de situações reais, a exploração da experiência sensorial do estudante ou a busca pelo desenvolvimento de suas habilidades investigativas, para citar apenas algumas possibilidades, não dispensam a preocupação com o rigor e a formalidade da ciência, características de um paradigma anterior no ensino de física. Finalmente, faz ainda recordar a propriedade das palavras de Drucker [11, p. 156], proferidas em uma palestra acerca do conhecimento:

...é necessário conhecer os fundamentos. (...) Todos nós tendemos a ser especialistas, e subimos na carreira publicando artigos eruditos de pesquisa em um periódico erudito sobre o mais recente

truque. E nós mesmos não enfatizamos os fundamentos. Nós os supomos conhecidos, o que é sempre um erro.

Conclusão

A análise dimensional desempenha um papel crucial na formação científica dos estudantes. Apesar de não mais se esperar que esse método demonstre *a priori* as leis da mecânica, seu objetivo inicial, conserva-se como um poderoso auxiliar para o entendimento da ciência e para a compreensão das grandezas envolvidas em suas equações.

A dimensão de uma grandeza permite reconhecer o vínculo que ela mantém com grandezas análogas e a diferenciá-la de outras com as quais não possui qualquer

semelhança. Esse método de estabelecimento da identidade de grandezas análogas, apesar de aparentemente diversas, é a análise dimensional. Ela realiza uma espécie de exame de DNA da estrutura subjacente às definições operacionais, que independente das unidades particulares em que são expressas.

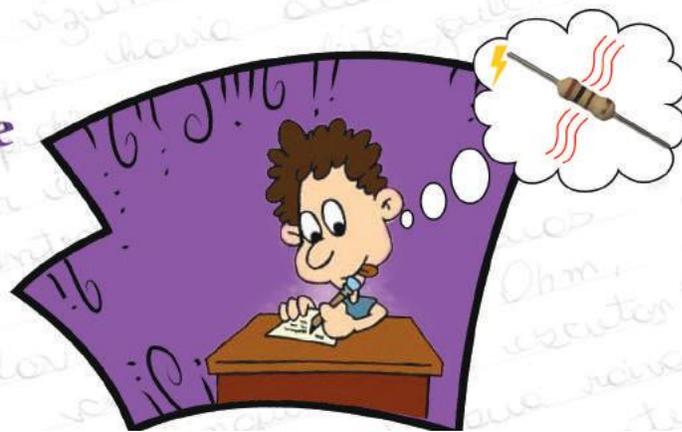
Os fatos aqui relatados sugerem a necessidade de ensinar as unidades de medida e a análise dimensional desde o início da formação científica do estudante. Uma vez perdida essa oportunidade, alguns estudantes carregarão ao longo da vida as deficiências oriundas de uma iniciação inadequada, podendo até alcançar a titulação máxima do grau acadêmico, cometendo erros inadmissíveis em um estudante regular do Ensino Médio.

Para obter os desvios α por um cálculo inverso, é necessário, em compensação, expressar L em decímetros

Referências

- [1] T.W.G. Solomons e C.B. Fryhle, *Química Orgânica* (LTC, Rio de Janeiro, 1998).
- [2] G. Gunawardena, Specific Rotation in *The Elements of Organic Chemistry*. Disponível em <http://www.ochempal.org/index.php/alphabetical/s-t/specific-rotation>, acesso em 26/4/2016.
- [3] Specific rotation, Dicionário Merriam-Webster. Disponível em <http://www.merriam-webster.com/dictionary/specific%20rotation>, acesso em 26/4/2016.
- [4] R.A. Martins, in: *Filosofia e História da Ciência no Cone Sul. 3º Encontro*, organizado por R.A. Martins, L.A.C.P. Martins, C.C. Silva, e M.H. Ferreira (Associação de Filosofia e História da Ciência do Cone Sul, Campinas, 2008).
- [5] D. de Foncenex, Sur les sprincipes fondamentaux de la mécanique, *Mélanges de Philosophie et de Mathématique de la Societé Royale de Turin* v. 2, p. 299-322, 1760-1761. Disponível em <http://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=uiug.30112067989589>, acesso em 26/4/2016.
- [6] T. Szirtes and P. Rozsa, *Applied Dimensional Analysis and Modeling* (McGraw Hill, New York, 1997).
- [7] Análise dimensional. Disponível em http://www.cefetsp.br/edu/okamura/analise_dimensional.htm, acesso em 26/4/2016.
- [8] Le système international d'unités, The International System of Units SI. Disponível em http://www.nist.gov/pml/div684/fcdc/upload/si_brochure_8.pdf, acesso em 26/4/2016.
- [9] J.B. Biot, *Introduction aux Recherches de Mécanique Chimique: Dans Lesquelles la Lumière Polarisée est Employée Auxiliairement Comme Réactif* (Mallet-Bachelier, Paris, 1860). Disponível em <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k951698.r>, acesso em 26/4/2016.
- [10] M.A. Moreira, Ensino de Física no Brasil: Retrospectiva e Perspectivas, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **22**, 94 (2000).
- [11] P.F. Drucker, *Drucker em 33 Lições: As Melhores Aulas do Homem que Inventou a Administração* (Saraiva, São Paulo, 2011).

Desenvolvendo a criatividade nas aulas de física



Roberto Gonçalves Barbosa
LECAMPO-Ciências da natureza,
Universidade Federal do Paraná,
Matinhos, PR, Brasil
E-mail: robertobarbosa@ufpr.br

Irinéa de Lourdes Batista
Departamento de Física, Universidade
Estadual de Londrina, Londrina, PR,
Brasil
E-mail: irinea@uel.br

Criatividade e a educação científica

O conceito de criatividade remete a emergência ou a criação de um produto novo, seja uma ideia ou uma invenção original, seja a reelaboração e o aperfeiçoamento de produtos ou ideias já existentes [1]. Pesquisas realizadas no âmbito educacional brasileiro indicam que prevalece nas escolas o forte predomínio de uma educação voltada excessivamente para o passado, com uma ênfase exagerada na reprodução do conhecimento e memorização de ensinamentos, inclusive exigindo do aluno, muitas vezes, informações irrelevantes ou ultrapassadas [2].

Do mesmo modo, na educação científica não existe um programa ou diretriz que incentive ou promova práticas criativas nas aulas de ciências; no entanto, pesquisas a respeito da criatividade [3, 4] apontam a ciência como um empreendimento altamente criativo no qual os seus produtos - invenções e explicações - são considerados frutos da imaginação humana.

Entretanto, no cotidiano das escolas brasileiras, ainda persiste um processo de ensino e aprendizagem, em especial em física, que fomenta a passividade dos estudantes diante da exposição a um número excessivo de conceitos e ideias abstratas que devem ser compreendidas e que por esta razão não oportuniza momentos para inventar ou criar algo novo [5, 6].

Diante disso e objetivando oportunizar momentos para o criar nas aulas de física, foi proposto aos estudantes de uma turma do terceiro ano do Ensino Médio de uma escola pública situada ao norte

do estado do Paraná, uma atividade em que estes deveriam elaborar um texto utilizando conceitos, termos e ideias da física que haviam sido previamente estudados.

Criando a partir de conceitos: A atividade

A atividade que é uma adaptação de uma técnica de produção de ideias presente no livro *O Processo de Criatividade* [7], foi desenvolvida com foco em dois objetivos:

avaliar o entendimento dos estudantes no que tange os conceitos da eletrodinâmica e oportunizar um momento para o uso da imaginação e da criatividade nas aulas de física. Metodologicamente a atividade foi conduzida da seguinte

No cotidiano das escolas brasileiras persiste um processo de ensino e aprendizagem, em especial em física, que fomenta a passividade dos estudantes diante da exposição a um número excessivo de conceitos e não oportuniza momentos para inventar ou criar algo novo

forma:

- Primeiramente foi solicitado aos alunos que falassem termos/conceitos relacionados a eletrodinâmica que haviam estudado e que foram elencadas na lousa pelo docente na seguinte sequência: eletricidade, corrente elétrica, resistência elétrica, as leis de Ohm, potência, tensão, Volts, Watts, Ampère, efeito Joule, resistores e aparelho elétrico.

- Com essas palavras, pediu-se que os alunos elaborassem uma pequena história a partir da seguinte frase: "Era meia noite, uma jovem dormia quando de repente..." com a condição de que os estudantes utilizassem todas as palavras seguindo ou não a sequência dada. A atividade poderia ser feita individualmente ou em duplas, a critério dos estudantes.

Um aspecto importante que deve ser destacado é que durante a aula foi dito aos estudantes que se tratava de uma atividade que não requeria um rigor conceitual, e que a única regra requerida era "soltar a imaginação".

Neste trabalho apresentamos uma experiência de ensino de física realizada com alunos do terceiro ano do Ensino Médio com foco na criatividade. A atividade proposta consistiu na elaboração de um texto pelos alunos baseado nos conceitos da eletrodinâmica ensinados durante as aulas. Os resultados mostram que a abordagem utilizada promoveu um ambiente favorável a produção de ideias bem como do uso da imaginação. Além disso, a prática desenvolvida serve como um modelo didático que poderá ser usado tanto para o desenvolvimento da criatividade dos alunos quanto como um instrumento de avaliação quando o objetivo for averiguar a aprendizagem conceitual dos estudantes.

Os resultados

Para expor os resultados deste trabalho, apresentamos uma pequena amostra dos textos elaborados pelos alunos e realizamos uma breve análise utilizando uma categorização temática adotada pelos autores deste artigo em outro trabalho de pesquisa, que se fundamenta no viés da mediação semiótica (linguagem) do pensamento do psicólogo russo Lev Vygotsky.

1) **Unidade temática ou de significação** - natureza da explicação adotada pelo aluno com relação aos fenômenos físicos.

Unidades de registro:

1.1) Explicação espontânea - apresenta um texto em que não se utiliza os termos científicos nem os seus sentidos e significados.

1.2) Explicação quase-reprodutora - apresenta um texto em que se adota os termos científicos, mas não os apresenta com o sentido e/ou significado conferidos pela física.

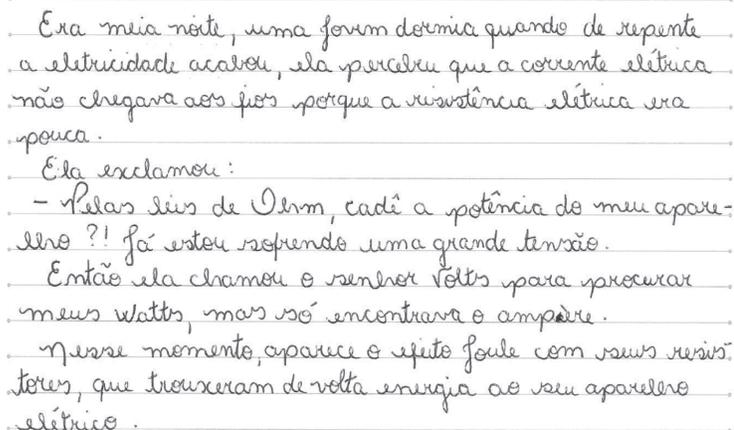
1.3) Explicação reprodutora - apresenta uma explicação em que se utiliza conceitos físicos, jargão e foco em aspectos considerados pela física para explicar o movimento dos corpos (explicação estritamente científica).

1.4) Explicação reprodutora-criativa - apresenta uma explicação que utiliza os conceitos e ideias da física por meio de sua própria (ou nova) linguagem - uma forma de expressão criativa dentro do escopo da física.

Neste texto, conforme mostra a Fig. 1, as explicações adotadas pelos estudantes são basicamente de natureza quase-reprodutora, porque, embora utilizem a terminologia da física, eles conferem outros significados aos conceitos: 'estou sofrendo uma grande tensão' e, outros sentidos: 'Então ela chamou o senhor Volts' como é o caso da unidade de medida de tensão que é personificada. Além disso, quando os estudantes se referem aos termos científicos/técnicos eles adotam uma explicação de senso comum, ou de uso cotidiano, como expressa a frase: 'a eletricidade acabou'.

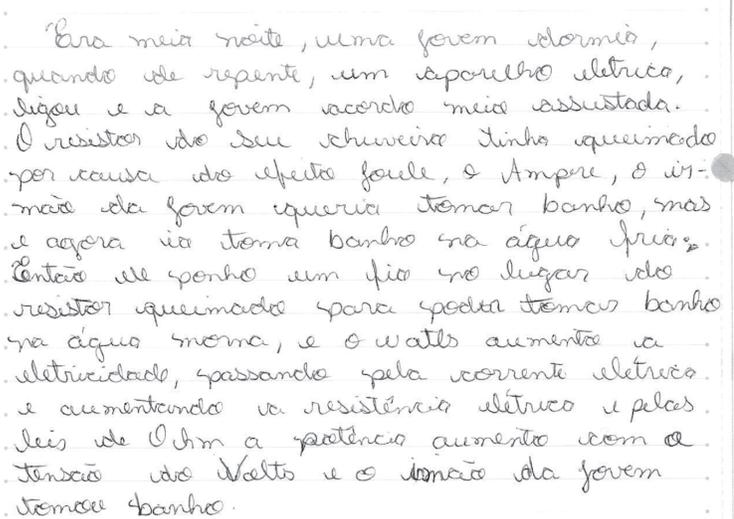
No texto apresentado na Fig. 2 encontramos uma explicação reprodutora: 'o resistor do seu chuveiro tinha queimado por causa do efeito joule' em que o aluno expressa os conhecimentos físicos ensinados. E também explicações quase-reprodutoras em que se personifica as unidades de medida: 'o Ampère, o irmão da jovem'.

A principal característica presente no texto da Fig. 3 é a explicação quase-reprodutora em que os estudantes utilizam a terminologia mas dão outro significado



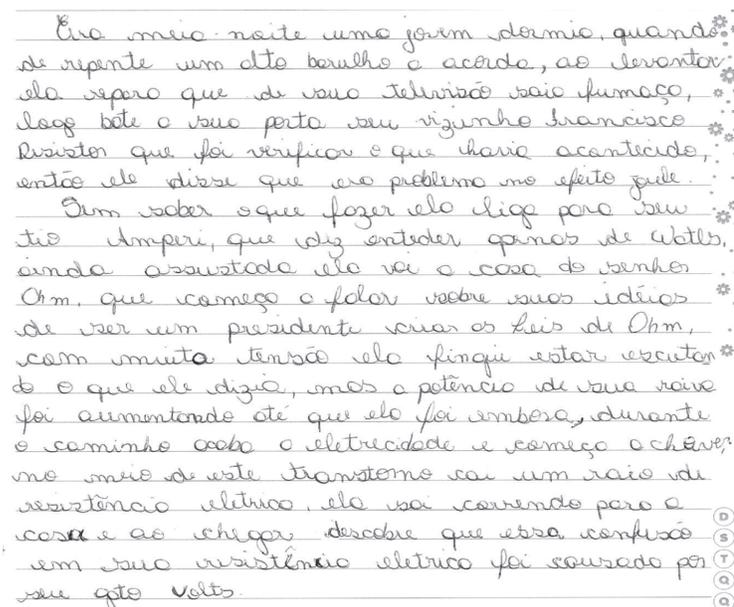
Era meia noite, uma jovem dormia quando de repente a eletricidade acabou, ela percebeu que a corrente elétrica não chegava aos fios porque a resistência elétrica era pouca.
Ela exclamou:
- Pelas leis de Ohm, caí a potência do meu aparelho?! Já estou sofrendo uma grande tensão.
Então ela chamou o senhor Volts para procurar meus watts, mas só encontrava o ampère.
Nesse momento, aparece o efeito joule com seus resistores, que trouxeram de volta energia ao seu aparelho elétrico.

Figura 1. Texto a respeito da queda de energia elétrica.



Era meia noite, uma jovem adormiu, quando de repente, um aparelho elétrico, ligou e a jovem acordou meio assustada. O resistor do seu chuveiro tinha queimado por causa do efeito joule, e Ampère, o irmão da jovem queria tomar banho, mas a agora vai tomar banho na água fria. Então ele pendeu um fio no lugar do resistor queimado para poder tomar banho na água quente, e o watts aumentou a eletricidade, passando pela corrente elétrica e aumentando a resistência elétrica e pelas leis de Ohm a potência aumentou com a tensão de Volts e o irmão da jovem tomou banho.

Figura 2. Texto a respeito do chuveiro e do efeito joule.



Era meio-noite uma jovem dormia quando de repente um alto barulho a acordou, ao levantar ela reparou que de sua televisão saía fumaça, logo bate o seu peito seu vizinho trançoso Resistor que foi verificado e que havia acantido, então ele disse que era problema no efeito joule.
Sem saber o que fazer ele ligou para seu tio Ampère, que diz entender apenas de watts, ainda assustada ela viu o caso do senhor Ohm, que começou a falar sobre seus ideais de usar um presidente para as leis de Ohm, com muita tensão ele fingiu estar escutando o que ele dizia, mas a potência de sua raiva foi aumentando até que ele foi embora, durante o caminho acabou a eletricidade e começou o chuveiro no meio de este transtorno vai um raio de resistência elétrica, ele usa corrente para a casa e ao chegar descobre que essa confusão em seu resistêncio elétrico foi causado por seu qto volts.

Figura 3. Texto a respeito da TV "queimada".

aos conceitos, fugindo do escopo da física. De modo particular, exploram a capacidade criativa inventando personagens com conceitos e unidades de medida, porém utilizando uma explicação de senso comum.

No texto intitulado "A menina e a bola de cristal" presente na Fig. 4 os alunos utilizam a linguagem científica, mas fogem do sentido e da significação atribuídos pela física, o que configura em uma explicação quase-reprodutora. A maioria das ideias recai sobre a personificação das unidades de medidas e também em concep-

ções de senso comum, como expresso na frase 'uma descarga elétrica de 50.000 Volts'.

Considerações finais

Os textos produzidos pelos estudantes permitem afirmar que a atividade proposta fomenta o uso da imaginação e da criatividade, e serve como recurso didático aos professores que querem avaliar a compreensão dos alunos em relação aos conhecimentos físicos ensinados, sejam eles da eletrodinâmica, da mecânica ou da óptica, porque este tipo de atividade envolve ape-

nas o entendimento conceitual.

No que tange a aprendizagem ou ao domínio dos conceitos, observa-se que os alunos expressam, em sua maioria, uma explicação de senso comum que se caracteriza como quase-reprodutora segundo a categorização apresentada na unidade de registro 1.2. Por outro lado, acredita-se que tal condição foi reforçada pelo modo como a atividade foi conduzida, em que se salientou que a mesma não exigia o rigor conceitual necessário, orientação que pode ter comprometido a construção criativa do texto com ênfase nos conceitos físicos, uma atitude que não deve ser repetida pelos docentes em outras aplicações desta atividade se desejarem que os estudantes expressem a sua criatividade a partir dos conceitos científicos (dimensão reprodutora-criativa).

Por fim, vale destacar que embora se pensasse inicialmente que os estudantes teriam dificuldade em criar e imaginar, nota-se que isso não foi uma barreira, pelo contrário, eles conseguiram utilizar a sua imaginação criando personagens e inventando histórias mirabolantes, o que nos mostra que os alunos têm um potencial enorme que pode ser explorado e que deve ser valorizado mesmo que suas produções não traduzam um domínio completo dos conceitos e ideias da física, porque aprender física continua sendo uma tarefa difícil. Mas isso não impede que após a conclusão dos textos pelos estudantes, o professor proponha um avaliação coletiva com o objetivo de tirar dúvidas e reiterar significados.

Referências

- [1] E.S. Alencar, D.S. Fleith, *Criatividade: Múltiplas Perspectivas* (Editora Universidade de Brasília, Brasília, 2003).
- [2] E.S. Alencar, *Como Desenvolver o Potencial Criador: Um Guia para a Liberação da Criatividade em Sala de Aula* (Vozes, Petrópolis, 2004).
- [3] P.M. Kind and V. Kind, *Studies in Science Education* **43**, 1 (2007).
- [4] G.F. Kneller, *Arte e Ciência da Criatividade*. Tradução de J. Reis (Ibrasa, São Paulo, 1978).
- [5] M.S.T. de Araújo e Maria Lúcia V. dos S. Abib, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **25**, 176 (2003).
- [6] Maurício Pietrocola e Terezinha Pinheiro, in: *Atas do VII Encontro de Pesquisa em Ensino de Física*, Florianópolis, 2000.
- [7] E.S. Alencar, *O Processo de Criatividade: Produção de Ideias e Técnicas Criativas* (Makron Books, São Paulo, 2000).

Em meia noite, uma jovem dormia quando de repente, apareceu em seu quarto, uma bola de cristal que tinha uma potência como ela nunca tinha visto, era algo inacreditável.

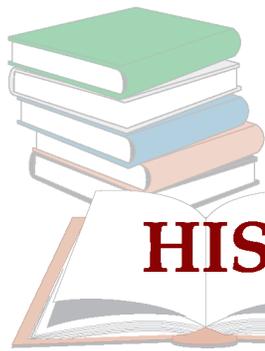
Ela brantou assustada com toda a igual corrente elétrica passando em seu quarto, era Muita Tensão, ela fitava sua mãe; assustada mas como a eletricidade era muito forte, fez um campo de força a qual sua voz não se propagava para fora do quarto.

Muito, seu pai, começa a achar algo estranho e vai até seu quarto.

Silenciosamente ele bate na porta do seu quarto mas ninguém responde então abre o armário do corredor e pega seu taco-elétrico, avança a porta do quarto e se depara na ampère tentando aniquilar sua filha então rapidamente ele dá uma tocada na cabeça da ampère e causa um efeito joule em sua mente ai o campo de energia se difunde a menina sai correndo do quarto pede para sua mãe se esconda pega o telefone e liga para polícia, qual para que venham ~~se~~ a ajudar então desliga o telefone então ela volta para seu quarto para ver se seu pai está bem e o encontra eletretatado então rapidamente ela pega o resistor e infeta ~~na~~ na veia de seu pai para tirar a corrente elétrica de seu corpo, ai ela se levanta e se depara com ampère, ele a incurcaba no canto é quando a polícia aparece pega seu aparelho elétrico e dispara uma descarga elétrica de 50,000 volta e os policiais conseguem prender ampère, a menina aliviada abraça o pai e fica tudo bem.

Des: Jornal feliz

Figura 4. Texto "A menina e a bola de cristal".



Notas da HISTÓRIA DA FÍSICA no Brasil

O Rei Está Nu - A palestra de Feynman no Brasil sobre o ensino de ciências na descrição de Oswaldo Frota-Pessoa

Esta é uma descrição da famosa conferência de Richard Feynman, realizada em 5 de maio de 1952, quando ele esteve no Brasil por um período sabático no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF), que se estendeu de setembro de 1951 a maio de 1952. Ela foi escrita pelo grande educador e biólogo brasileiro Oswaldo Frota-Pessoa, que também se dedicou, por décadas, à educação e à divulgação científica escrevendo muitas colunas em jornais e publicando livros de ciências. Frota-Pessoa recebeu, em 1982, o Prêmio Kalinga de divulgação científica da UNESCO.

Feynman lecionou no Rio de Janeiro, naquele período, para alunos de física e engenharia. Em maio de 1952, quando encerrava suas atividades no Brasil, foi convidado para fazer uma palestra para estudantes, professores e autoridades educacionais sobre as suas impressões e opiniões referentes à experiência que teve com o ensino superior no Brasil. Essas experiências como professor e a palestra foram relatadas com detalhes no seu livro *O Senhor Está Brincando, Sr. Feynman!* [1].

Em artigo anterior, publicado em sua coluna *Ciência em Marcha* no Jornal do Brasil, em 4 de maio de 1952, Frota-Pessoa anunciava a palestra de Feynman e o propósito dela: “Reconhecendo a urgência de se aperfeiçoarem nossos métodos de ensino superior de ciências, a Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência (Divisão Rio) convidou o professor Feynman, um dos mais ilustres físicos modernos, para fazer uma

conferência sobre o tema *Minha experiência como professor no Brasil*, que se realizará no salão nobre da Faculdade Nacional de Filosofia (Av. Antônio Carlos 401, segunda-feira, 5 de maio às 20:30 horas. Esta palestra, para a qual estão convidados todos os interessados, será também patrocinada pelo Departamento de Física e pelo Diretório Acadêmico daquela faculdade.

Nela, o professor Feynman analisará o problema do ensino superior das ciências tomando por base sua experiência nos Estados Unidos e no Brasil, onde tem dado cursos nas Faculdade

de Filosofia e de Engenharia e no CBPF.”

O interessante artigo de Frota-Pessoa, reproduzido a seguir, descreve o impacto local que a conferência de Feynman gerou, além de destacar a sua informalidade e o envolvimento que ela gerou entre professores e estudantes. Ela fornece, ainda, uma descrição mais contida do acontecimento, em contraposição ao estilo gongórico de Feynman, sem retirar o cerne de sua crítica precisa e contundente: “A Ciência em Marcha” - NÃO SE APRENDE NADA. Assisti uma conferência espantosa. Um físico de fama mundial no setor da eletrodinâmica quântica, Richard P. Feynman, do California Institute of Technology (EUA), nos disse, em português claro, embora estropiado (um ano de Brasil), que, em verdade, *não estamos ensinando ciência e nossos alunos não estão aprendendo*. Isto, de um modo geral, em muitas cátedras universitárias do Brasil e do estrangeiro, inclusive dos Estados Unidos. E o pior é que ele tem toda a razão.

Envolvidos em nosso narcisismo, mantemos a convenção de que temos um sistema universitário, senão perfeito, pelo menos muito satisfatório. Feynman nos diz que é péssimo, e o demonstra com incrível simplicidade

O rei nu

Feynman é um homem raro: diz diretamente o que pensa e tudo o que pensa: e diz com tal entusiasmo e amor que se torna ao mesmo tempo contundente e encantador.

O prof. Costa Ribeiro, chefe do Departamento de Física da Faculdade Nacional de Filosofia (que patrocinou esta conferência promovida pela Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência), comentou com muita agudeza, durante os debates que se seguiram, que Feynman tem o bom senso sadio das crianças (e, acrescentamos, redobrando o elogio, a mesma ausência de respeito humano). Comparou-o ao menino que, naquele conto bem conhecido, foi a única pessoa a dizer que o rei estava nu.

Envolvidos em nosso narcisismo, mantemos a convenção de que temos um sistema universitário, senão perfeito, pelo menos muito satisfatório. Feynman nos diz que é péssimo, e o demonstra com incrível simplicidade, baseado em fatos que estamos fartos de conhecer e aos quais fechamos os olhos - olhos que ele nos obriga a abrir, e que se abrem, então, estarecidos e atônitos.

Duas ideias

“A ciência tem valor” e “não estamos ensinando nada” foram as duas únicas ideias que Feynman disse que ia desenvolver já que a terceira - “como ensinar bem” - transcendia da competência dele, que é pesquisador e não pedagogo.

Mas a verdade é que nos disse o mais importante sobre como ensinar. Ciência é a descrição dos fenômenos da Natureza, postulou ele, referindo-se às ciências físicas naturais (e não à matemática). Ensinar ciência é, portanto, por os alunos em contato com os fenômenos naturais. O ensino

A CIÊNCIA EM MARCHA

NÃO SE APRENDE NADA

Assisti uma conferência espantosa. Um físico de fama mundial no setor da eletrodinâmica quântica, Richard P. Feynman, do California Institute of Technology (E. U.) nos disse, em português claro, embora estopado (um ano de Brasil), que, em verdade, *não estamos ensinando ciência, e nossos alunos não estão aprendendo.* Isto, de um modo geral, em muitas cadeiras, universitárias do Brasil e do estrangeiro, inclusive dos Estados Unidos.

E o pior é que ele tem toda a razão.

O REI NU

Feynman é um homem raro: diz diretamente o que pensa, e tudo o que pensa; e diz com tal entusiasmo e amor que se torna ao mesmo tempo contudente e encantador.

O prof. Costa Ribeiro, chefe do Departamento de Física da Faculdade Nacional de Filosofia (que patrocinou esta conferência promovida pela Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência) comentou com muita agudeza, durante os debates que se seguiram, que Feynman tem o bom senso sadio das crianças (e acrescentamos, redobrando o elogio, a mesma ausência de respeito humano). Comparou-o ao menino que, naquele conto bem conhecido, foi a única pessoa a dizer que o rei estava nu.

Envolvido em nosso narcisismo, mantemos a convenção de que temos um sistema universitário, só não perfeito pelo menos muito

os fatos, não consegue fazer um livro vivo, que aguce o interesse e a iniciativa do leitor.

REVOLUÇÃO NECESSÁRIA

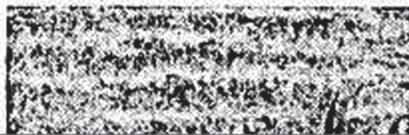
Se queremos realmente fazer progredir a ciência no Brasil, urge revolucionar nossos métodos didáticos, em todos os níveis: primário, secundário e superior.

Como assinalou muito bem Costa Ribeiro, 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 os 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 idéias objetivas e sugestões felizes para melhoramento dos nossos métodos de ensino.

Esperemos que este magnífico impulso inicial nos leve longe.

Oswaldo Frota-Pessoa



maus livros. Nossos livros didáticos são, em geral, como que dicionários sem ordem alfabética: mas dicionários de definições, de palavras mortas, de conceitos que, por não terem emergido diretamente dos fatos, pertencem a um mundo artificial e inútil criado pelo *complot* pedagógico contra a inteligência do jovem. Nossos autores didáticos são na maioria puros compiladores: e quem não pesquisa, não lida com os fatos, não consegue fazer um livro vivo, que aguce o interesse e a iniciativa do leitor.

Revolução necessária

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 Ribeiro, 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 idéias objetivas e sugestões felizes para melhoramento dos nossos métodos de ensino. Esperemos que este magnífico impulso inicial nos leve longe.

Referência

[1] Richard P. Feynman, *O Senhor Está Brincando, Sr. Feynman!* (Elsevier Editora, Rio de Janeiro, 2006).

"A Ciência em Marcha". NÃO SE APRENDE NADA. Artigo de Oswaldo Frota-Pessoa no Jornal do Brasil de 25 de maio de 1952.

usual, adstrito a definições e fórmulas mortas memorizadas ou mesmo entendidas, não chega a ser ensino de ciência. Só quando o estudante está pesquisando fatos reais, que efetivamente se estão desenrolando perante ele (e não imaginariamente no quadro negro), só quando investiga, aguçado pela curiosidade e pelo encantamento ante o mistério, está ele aprendendo ciência.

O valor da ciência

A ciência tem transcendental importância, e por vários motivos permite o desenvolvimento da indústria e do bem-estar geral. Mas o desenvolvimento técnico, em si mesmo, não é sempre um bem: conduz ao avião comercial, mas também conduz ao bombardeio a jato; dá origem à penicilina e à bomba atômica. O maior valor da ciência, diz Feynman, é alimentar

a curiosidade e nos dar o inigualável prazer de desvendar o desconhecido. Devemos ensiná-la para ampliar o círculo dos que podem participar da deliciosa aventura de conhecer.

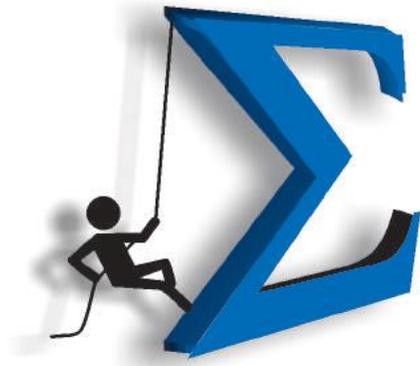
Criar um mundo artificial, puramente abstrato, sem contato com a realidade, onde ficam presos os alunos nas aulas, nas viradas, nos exames, não é ensinar ciência, é simplesmente adestrar jovens a responder certas frases estereotipadas quando ouvem perguntas convencionais. Os melhores alunos, neste sistema, não sabem responder aos problemas que os acontecimentos naturais levantem e nem chegam mesmo a percebê-los, pois de há muito ficaram com a curiosidade e o próprio senso comum embotados.

Os livros-sepulturas

O ensino sem fatos é agravado pelos

Ildeu de Castro Moreira
Instituto de Física,
Universidade Federal
do Rio de Janeiro,
E-mail: ildeucaastro@gmail.com

Matheus Costa Paiva
Aluno do Curso de Licenciatura
Instituto de Física,
Universidade Federal
do Rio de Janeiro,



Problemas Olímpicos

Soluções dos problemas propostos em FNE v. 12, n. 2 – outubro de 2011
<http://www.sbfisica.org.br/fne/Vol12/Num2/a14.pdf>

1 Uma bola de ping-pong flutuando em um vidro com água, contido em um recipiente hermeticamente fechado, onde mais ar é adicionado no recipiente.

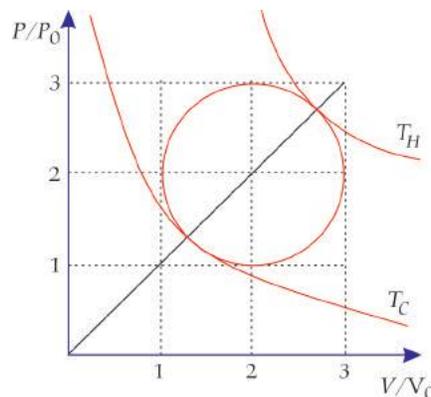
Solução: basta lembrar que a bola de ping-pong flutua tanto na água como no ar. Como a pressão do ar aumenta, a bola irá afundar mais.

2 O alcance de um canhão escorado contra uma árvore massiva de modo a reduzir o seu recuo.

Solução: o alcance aumentará. Considere a conservação de energia. Grande parte da energia potencial da pólvora será convertida em energia cinética quando esta explodir. Isto é, convertida tanto para a energia cinética do projétil como do recuo do canhão. Uma vez que a árvore reduz o recuo do canhão, o projétil adquire uma energia cinética maior, aumentando assim seu alcance.

3 Eficiência de um ciclo de Carnot operando entre as temperaturas máxima e mínima do gás no ciclo circular.

Solução: para um ciclo de Carnot, a eficiência depende somente das temperaturas mais alta e mais baixa onde o ciclo opera, ou seja, $\eta = 1 - \frac{T_C}{T_H}$, sendo T_C e T_H as temperaturas mais fria e a mais quente, respectivamente. Assim, basta calcular as temperaturas máxima e mínima do ciclo circular. Reescrevendo o gráfico para P/P_0 versus V/V_0 resulta



Assim, basta calcular os pontos em que as isotermas tangenciam o círculo. Ou seja

$$\frac{P}{P_0} = \frac{V}{V_0} = 2 + \frac{\sqrt{2}}{2}$$

e

$$\frac{P}{P_0} = \frac{V}{V_0} = 2 - \frac{\sqrt{2}}{2}.$$

Lembrando a equação de estado do gás ideal, $PV = nRT$, podemos escrever

$$\left(2 + \frac{\sqrt{2}}{2}\right)^2 P_0 V_0 = nRT_H$$

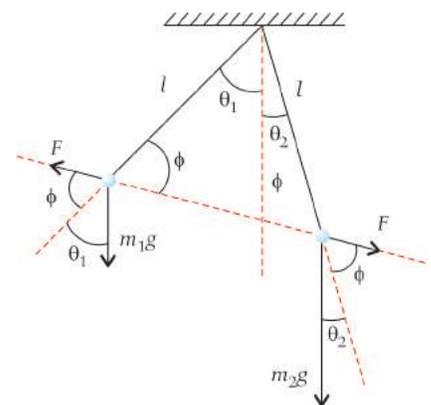
e

$$\left(2 - \frac{\sqrt{2}}{2}\right)^2 P_0 V_0 = nRT_C.$$

Portanto a eficiência pedida, após alguns cálculos simples é $\eta = 77,19\%$.

4 Ângulo entre duas pequenas esferas carregadas positivamente suspensas por um mesmo ponto no teto por linhas isolantes e muito leves de comprimentos iguais.

Solução: a primeira esfera tem massa m_1 e carga q_1 e a segunda massa m_2 e carga q_2 . A primeira linha faz um ângulo θ_1 com a vertical, e a segunda faz um ângulo θ_2 . Como os fios possuem o mesmo comprimento, eles formam os lados de um triângulo isósceles. A figura abaixo identifica os ângulos relacionados com o problema.



No equilíbrio as forças devem se balancear. Assim os componentes das forças perpendicular aos fios resulta em

$$m_1 g \text{sen}(\theta_1) = F \text{sen}(\phi) = m_2 g \text{sen}(\theta_2)$$

Resolvendo para θ_2 determinamos

$$\theta_2 = \arcsen\left(\frac{m_1 \text{sen}(\theta_1)}{m_2}\right).$$