

Atividades experimentais no ensino de óptica: uma revisão

(*Experimental activities in optics teaching: a revision*)

Jair Lúcio Prados Ribeiro¹ e Maria de Fátima da Silva Verdeaux²

¹Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências, Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil

²Instituto de Física, Universidade de Brasília, Brasília, DF, Brasil

Recebido em 24/10/2011; Aceito em 25/5/2012; Publicado em 10/12/2012

Apresentamos nesse trabalho uma revisão de artigos que tratam sobre a experimentação no ensino de óptica, entre 1998 e 2010. Os artigos revisados foram publicados nos seguintes periódicos: Caderno Brasileiro de Ensino de Física, Revista Brasileira de Ensino de Física e Física na Escola. O objetivo dessa revisão é fornecer um panorama atualizado da pesquisa na área de experimentação em óptica, dividida e classificada por temas: natureza da luz, reflexão, refração, difração, polarização, interferência e espalhamento. Enfatiza-se também a necessidade de produção de revisões semelhantes em outras áreas temáticas.

Palavras-chave: óptica, experimentação, natureza da luz, reflexão, refração, difração, espalhamento, interferência, polarização.

We present in this work a review of articles dealing on experimentation in optics teaching, between the years 1998 to 2010. The reviewed articles were published in the following journals: Caderno Brasileiro de Ensino de Física, Revista Brasileira de Ensino de Física and Física na Escola. The purpose of this review is to provide an updated overview of research in optical experiments on divided and classified by themes: nature of light, reflection, refraction, diffraction, polarization, interference and scattering. We also emphasize the need for production of similar revisions in other thematic areas.

Keywords: optics, experimental, nature of light, reflection, refraction, diffraction, scattering, interference, polarization.

1. Introdução

O entendimento da natureza da ciência de um modo geral, e da física em especial, constitui um elemento fundamental à formação da cidadania. As dificuldades e problemas no ensino de física, entretanto, não são recentes, e várias propostas para viabilizar o ensino dessa disciplina têm sido propostas ao longo dos anos. A experimentação como recurso didático é uma das mais frequentes.

A Ref. [1] afirma que “os autores são unânimes em defender o uso de atividades experimentais”, em especial pela capacidade intrínseca dos experimentos em estimular a participação ativa dos estudantes, despertando sua curiosidade e interesse, além da tendência que a experimentação propicia para a construção de um ambiente motivador. Durante a revisão [1], é mostrado que há uma variedade significativa de possibilidades e tendências de uso da experimentação. Na literatura revisada, a experimentação é proposta e discutida de maneira bastante diversa quanto ao significado que essas

atividades podem assumir, dependendo do contexto escolar. Como principais linhas de aplicação, encontram-se métodos de verificação de modelos teóricos, atividades de demonstração, observação investigativa e experimentação investigativa.

A pesquisa sobre o uso de experimentos em sala de aula, entretanto, não é homogênea em todas as áreas temáticas da física. Atividades experimentais no ensino de mecânica são mais presentes na literatura revisada na Ref. [1], a seguir: Caderno Brasileiro de Ensino de Física, Revista Brasileira de Ensino de Física e Física na Escola, entre os anos de 1992 a 2001, com a óptica ocupando o segundo lugar na mesma lista, como mostrado na Tabela 1. Tal fato, em nossa opinião, aponta para a necessidade de revisões mais específicas na área da experimentação como recurso didático, dado o grande número de artigos dedicados a cada área temática. Nosso trabalho tem a intenção de fornecer um referencial adequado àqueles que estejam fazendo pesquisas na área de experimentação em óptica, fornecendo um panorama geral da pesquisa atual nessa área.

¹E-mail: jairlucio@ig.com.br.

Tabela 1 - Artigos sobre experimentação em física, agrupados por área temática [1, p. 178].

Área	92	93	94	95	96	97	98	99	00	01	Total	%
Mecânica	0	1	3	5	1	2	3	2	2	9	28	30,4
Ótica	0	0	3	1	1	1	2	4	3	6	21	22,8
Eletromagnetismo	0	4	1	0	0	2	2	5	2	3	19	20,7
Física moderna	0	1	0	0	0	0	2	2	0	2	7	7,6
Calorimetria	0	2	0	1	0	0	1	0	0	0	4	4,3
Hidrodinâmica	0	0	0	1	1	0	0	1	0	1	4	4,3
Gases	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	3	3,3
Astronomia	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	3	3,3
Ondulatória	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	3	3,3
Total	0	9	9	9	4	5	10	17	8	21	92	100

2. Metodologia da revisão

A revisão bibliográfica apresentada nesse trabalho foi realizada sobre artigos presentes em periódicos de ampla circulação e disponíveis gratuitamente na rede mundial de computadores. Os artigos revisados abrangem os anos de 1998 a 2010. Originalmente, optamos pelos seguintes periódicos como literatura a revisar: *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, *Física na Escola*, *Investigações em Ensino de Ciências*, *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias* (Espanha) e *Latin-American Journal of Physics Education* (México). Ao longo da revisão, entretanto, percebemos que apenas os três primeiros periódicos continham artigos dedicados à experimentação em óptica. Assim, nossa revisão acabou por usar os mesmos periódicos revisados na Ref. [1], permitindo uma análise da presença de artigos sobre experimentação em óptica nessas fontes desde 1992 até 2010.

A óptica é uma área de conhecimento ampla, e seus fenômenos estão intimamente interligados ao eletromagnetismo, à ondulatória, à física quântica, à relatividade e até mesmo à mecânica, em alguns casos (como a fotografia estroboscópica de projéteis). Para os objetivos dessa revisão, nos dedicamos a categorizar os artigos que tratassem de tópicos associados à natureza da luz (como aqueles voltados à formação de sombras, eclipses ou cores) e aos fenômenos da reflexão, refração, difração, interferência, polarização e espalhamento.

Alguns artigos apresentaram dificuldades na caracterização: por exemplo, no artigo [2-4] há uma exposição detalhada da refração que ocorre nas lentes de retroprojetores, para depois mostrar como esses instrumentos podem ser usados em experiências de difração da luz. Nesses casos, optamos por classificar o artigo a partir de sua finalidade última. Assim, o artigo citado foi classificado como pertencente ao tema “difração”. Já o artigo [3] passou por problema semelhante, pois se dedicava aos campos visuais de espelhos e lentes. Nesse caso, optamos por classificá-lo no tema “reflexão”, pois um maior número de exemplos era dado para esse fenômeno. O artigo mais controverso em termos de classificação foi o trabalho [4], pois a proposta

dos autores é para um curso completo de óptica, sendo difícil classificá-lo em apenas uma categoria. Como a proposta do autor é a compreensão da luz e do processo de visão, encaixamos o artigo dentro do tópico “natureza da luz”. Nesse tópico também foram incluídos os textos propondo a visualização de eclipses e sua interpretação [5], pois o tratamento qualitativo dos eclipses é um tema sempre presente no capítulo introdutório da óptica geométrica nos livros didáticos, logo após a apresentação da formação de sombras e penumbras.

Alguns artigos revisados não são exatamente dedicados à atividade experimental como recurso didático [6-9]. Entretanto, esses artigos se propõem a explicar situações práticas, que poderiam ser transpostas facilmente para o cotidiano escolar através de experiências didáticas. Assim, optamos por manter tais artigos na revisão.

A Tabela 2 apresenta a tabulação dos resultados, após os artigos terem sido classificados de acordo com o tópico de estudo. Se a análise dos dados for realizada em forma gráfica, constante na Fig. 1, é possível observar um crescimento significativo na pesquisa na área de experimentação em óptica. Entre os nove anos iniciais (1992 a 2000), foram publicados 17 artigos nessa área, enquanto entre os nove anos finais (2001 e 2009) houve a publicação de 47 artigos, um aumento vertiginoso (276%) na produção nessa área de pesquisa. A necessidade de um compêndio desse volume de produção, a nosso ver, é justificada pela necessidade de apresentar aos novos pesquisadores da área o *status quo* da pesquisa em experimentação em óptica, para que esses profissionais possam se dedicar às lacunas porventura existentes.

3. Temas da revisão

3.1. Natureza da luz

Nas obras didáticas, o primeiro capítulo de óptica é em geral dedicado a uma rápida apresentação da natureza dual da luz, seguida dos princípios de propagação de um raio de luz (propagação retilínea, independência e reversibilidade) e a apresentação da velocidade da luz no vácuo como uma constante da natureza. Como con-

seqüências desses princípios, são normalmente citadas a formação de sombras, penumbras, os eclipses solares e lunares e a formação de imagens reais (com destaque especial para as produzidas por câmaras escuras) e virtuais. O conceito de cor também é usualmente apresentado nesse capítulo introdutório, com o mecanismo de

visão colorida dos seres humanos merecendo um maior destaque nas obras recentes [10-12]. O mesmo ocorre na literatura: um número significativo dos artigos revisados dedica-se a apresentar experiências associadas à adição de cores.

Tabela 2 - Classificação dos artigos por tópico de estudo e ano de publicação.

Tema / Ano	98	99	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	Total
Natureza da luz			1	1	1	1	2			1	3	1	2	13
Reflexão			1	1			3		1	1	1			8
Refração	1	2	2	2	1		1	1	2	1	3	1		17
Difração		2		2	3			1		2	1	1	1	13
Interferência	1			1			2			1			1	6
Polarização	1							1	1					3
Espalhamento					1						1		2	4
Total	3	4	4	7	6	1	8	3	4	6	9	3		58

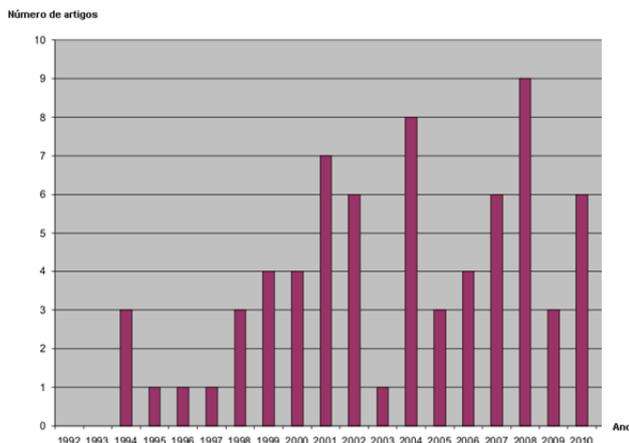


Figura 1 - Número total agregado de artigos publicados sobre experimentação em óptica, em função do ano de publicação.

A preocupação do trabalho [4] é com a estrutura de um curso baseado nas concepções alternativas dos alunos sobre luz e visão, para tentar promover o ensino dos temas da óptica geométrica de forma mais coerente e significativa. É claro que a superação dessas concepções passa pela experimentação, extremamente valorizada pelos autores no corpo do texto do artigo. Já a consideração de que a trajetória da luz é essencialmente retilínea é fundamental para a explicação dos fenômenos da sombra e penumbra, e a eventual resolução de exercícios didáticos. Outro artigo [13] propõe um experimento com um apontador laser para a demonstração dessa propriedade, enquanto outro trabalho [14] se dedica à construção de um banco óptico de baixo custo, fundamental para o desenvolvimento de experimentos associados à natureza da luz.

O princípio da propagação retilínea é usado na Ref. [6] para investigar como a sombra de um dado edifício ou torre a ser construída em área de grande densidade populacional incidirá sobre a região, trazendo ou não dificuldades de acesso à luz solar. Apesar da argumentação do artigo ser fundamentalmente teórica, propõem-se situações que poderiam ser facil-

mente transpostas para o cotidiano escolar. Sua técnica é aplicada a uma “experiência de pensamento” (uma torre na praia de Ipanema), mas a técnica poderia ser transposta por um professor a qualquer outra sombra. Sombras e penumbras também são discutidas na Ref. [15], em seu tratamento sobre o “encolhimento” das sombras.

Eclipses solares e lunares são o tema do artigo [5], com um tom intencionalmente didático, típico de livros-texto, buscando apresentar um texto de referência sobre o tema para os professores. Os autores dão uma particular importância à explicação da cor avermelhada da Lua durante um eclipse lunar. Os autores propõem também uma montagem experimental simples para simular eclipses em sala de aula, utilizando uma lâmpada como representação do Sol e duas bolas de isopor para a Terra e a Lua.

Experimentos onde estejam presentes a superposição de feixes coloridos (vermelhos, verdes e azuis) para a demonstração da adição de cores primárias aparecem em várias fontes [16-19]. Os autores diferenciam-se no realce que dão às diferentes facetas do tema. Encontramos nesses textos concepções teóricas detalhadas sobre o conceito de cor em física [16], bem uma sugestão de construção de uma “caixa de cores” para a demonstração da adição de cores [17]. Nesse último, a montagem envolve lâmpadas incandescentes coloridas, filtros, lentes, fiação elétrica, caixa de madeira, suportes metálicos e outros adereços, que tornam a sua montagem relativamente trabalhosa, apesar do baixo custo dos materiais envolvidos. Uma montagem experimental ainda mais refinada é proposta em outro artigo [18], os quais elaboram um simulador do mecanismo biofísico responsável pela visão das cores por seres humanos utilizando materiais acessíveis e de baixo custo, como multímetros, filtros e lâmpadas LED (*light emitting diode*, ou diodo emissor de luz). O aparelho simulador, entretanto, não é simples de ser construído, mas segundo os autores, permite verificar como funciona o mecanismo de codificação e decodificação das cores. Já

o disco de Newton, sempre associado à temática da cor, ganha uma nova versão “multissensorial” [19]: a fusão de cores para a produção da luz branca é complementada pela fusão de sons, paladares e texturas olfativas, em uma criativa montagem. A arte e a óptica também se fundem em outra proposta interdisciplinar [20], em particular seu uso em estereogramas ou ilusões de óptica em art (*op art*).

Abandonando a temática da cor, o texto [21] apresenta uma sugestão interessante para fotografar eventos muito rápidos, como a explosão de uma bexiga ou a deformação de uma bola durante um chute, a partir da realização de tais eventos em uma sala absolutamente escura. A técnica é mais refinada do que parece na primeira leitura: a conexão entre o microfone e o flash independente, por exemplo, não é trivial. Entretanto, a montagem sugerida apresenta uma aplicação para as ultrapassadas máquinas fotográficas ópticas, mostrando a utilidade didática que os aparelhos ópticos do passado ainda possuem. Todavia, as atuais máquinas digitais também podem ser utilizadas em experimentos outrora de alto custo, como a fotografia de estrelas e constelações [22], contanto que ajustes técnicos convenientes sejam feitos nesses aparelhos, como tempo de exposição e abertura do diafragma. A projeção de imagens reais, fundamental na fotografia, também é o tema da Ref. [23], que mostra que a luz filtrada através das folhas da vegetação produz círculos e elipses luminosas no chão ou em paredes, as quais são imagens reais do Sol, semelhantes às produzidas em uma câmara escura. Os eclipses do Sol, naturalmente, também podem ser observados nessas imagens.

3.2. Reflexão

Encontramos em [12] uma explanação sobre a reflexão e a refração da luz, afirma: “dizemos que a luz é *refletida* quando ela retorna ao meio de onde veio – o processo é chamado de *reflexão*”. Os livros didáticos de física voltados para o ensino médio costumam dedicar, dois capítulos ao seu estudo, o primeiro dedicado ao estudo da reflexão em superfícies planas e o segundo dedicado ao estudo da reflexão em superfícies côncavas [10,24]. Outras obras apresentam tais temas em um único capítulo [11,25], mas essa mesma divisão está presente nos tópicos internos do capítulo dedicado à reflexão.

Os artigos dedicados à reflexão luminosa geralmente apresentam sugestões de experiências de baixo custo que podem ser facilmente transpostas para o cotidiano escolar. A revisão desses artigos demonstrou ainda que os autores dedicados ao estudo de experiências que envolvam a reflexão luminosa possuem uma forte preocupação com o tema da formação de imagens, tanto reais quanto virtuais, o qual possui um forte destaque nos livros-texto, mas com lacunas cobertas pelas pesquisas presentes na literatura.

Um tópico ausente nos livros-texto aparece na Ref. [7]: o que exatamente é visto ao se mirar em um espelho côncavo. Sendo notório que a presença do olho influencia na visualização, os autores apresentam situações onde as imagens ditas invertidas ou impróprias se apresentam direitas ao observador, dependendo da posição em que o olho (analisado como uma lente convergente) esteja localizado. Uma adequada posição do olho permite a visualização de uma imagem direita e menor que o objeto, mas a discussão da possibilidade de visualização dessa imagem nos diferentes pontos não está presente em nenhuma das obras didáticas consultadas [10-12,24-25].

Outro tema pouco discutido nos livros didáticos também é contemplado [3]: a construção de campos visuais de espelhos curvos. Embora presente em uma rápida passagem de uma obra [12], a discussão da construção e emprego desses campos em geral se restringe ao caso particular do espelho plano [25]. Assim, os autores apresentam uma visão qualitativa, baseada nos princípios da óptica geométrica, visando à complementação (e não a substituição) da forma quantitativa como são em geral apresentados os tópicos de construção de imagens em espelhos não-planos e lentes esféricas. A projeção da luz do Sol a partir do uso de espelhos planos, em especial o caso particular da projeção da imagem do Sol durante um eclipse, também não é discutido nos livros-texto consultados, mas o artigo [26] mostra que, ao se refletir a luz do Sol em um anteparo apropriado, observa-se uma mancha ou uma imagem real. A partir de uma montagem apropriada, utilizando-se apenas espelhos planos, pode-se observar uma imagem real do Sol, e até mesmo projetá-lo durante um eclipse, sem risco para os observadores. Essa discussão é bastante apropriada, pois apesar dos livros didáticos afirmarem que nos espelhos planos, o objeto e a respectiva imagem têm sempre naturezas opostas, isto é, se o primeiro for real, o outro será virtual e vice-versa, exemplos de imagens reais fornecidas por espelhos planos são raramente citados nessas obras.

Experimentos que podem ser realizados com espelhos côncavos e convexos também estão presentes na literatura [27,28]. De forma inusitada, esses artigos utilizam os princípios geométricos da óptica de tais espelhos em objetos que não são citados como espelhos curvos em obras didáticas, mas no cotidiano se comportam como tais: o vidro de uma lâmpada incandescente [27] e uma xícara [28]. Uma experiência de custo praticamente nulo é apresentada na Ref. [27]: a reflexão da luz das lâmpadas de iluminação da sala no bulbo de uma lâmpada incandescente. A formação de duas imagens (uma real e outra virtual) no interior da lâmpada demonstra a utilidade dos princípios da óptica geométrica. Os autores descrevem o vidro que compõem o bulbo como dois espelhos, um côncavo e um convexo, e facilmente demonstram o surgimento das imagens. Também de custo nulo, é apresentado um tratamento qualitativo

da cáustica [28], a curva onde raios de luz paralelos incidentes em um espelho côncavo são projetados, a partir da reflexão em um espelho côncavo (a face interior de uma xícara). Tal discussão é pertinente: um tradicional livro-texto [10], ao discutir as condições de nitidez da imagem produzida por um espelho esférico, afirma que “os raios incidentes sobre os espelhos devem ser paralelos ou pouco inclinados em relação ao eixo principal e próximos dele (raios para-axiais)” [10]. A necessidade dessa proximidade é claramente demonstrada na experiência sugerida, pois a formação da cáustica após a reflexão dos raios na face interna da xícara evidencia que espelhos esféricos que obedecem as condições de Gauss são relativamente raros.

Finalmente, um grupo de artigos se dedica ao estudo de instrumentos ópticos que têm como princípio de funcionamento a reflexão luminosa, principalmente a construção pelos próprios estudantes de telescópios simples ou a confecção dos espelhos côncavos a serem usados nesses aparelhos. Nesses textos, há ênfase nos benefícios que sua construção pode trazer para o aprendizado da óptica [29] ou na utilização dos instrumentos construídos em observações astronômicas [30], ou ainda uma motivação diferente, mas não menos pertinente: o custo de espelhos parabólicos é alto, mesmo para fins didáticos. O artigo [31] apresenta uma alternativa barata, mas não exatamente simples, para a construção de espelhos parabólicos.

3.3. Refração

Ao apresentarem a refração da luz, os livros didáticos costumam apresentar uma divisão em capítulos praticamente idêntica. Nas obras [10,24,25], o tema é dividido em três capítulos: “Refração” (capítulo 16), “Lentes esféricas delgadas” (capítulo 17) e “Instrumentos ópticos” (capítulo 18), com títulos idênticos em tais obras.

A motivação primária dos autores de artigos dedicados aos aspectos teóricos da refração não difere da presente nos artigos sobre a reflexão: o preenchimento das lacunas dos livros-texto. Ao contrário do que foi observado na revisão dos artigos dedicados à reflexão, os artigos que estudam os aspectos experimentais da refração da luz são frequentes na literatura. Os tópicos de estudo desses últimos são variados, como o entendimento do olho humano e dos defeitos de visão [32-34], demonstrações experimentais da reflexão interna total [35], a variação do grau de convergência de uma lente com o meio no qual ela está imersa [36], a projeção de imagens [37], a invisibilidade [38] e a construção de lunetas de baixo custo [39].

Uma das dificuldades no ensino experimental da refração é a obtenção de bons instrumentos ópticos, tais como prismas, lentes, cilindros, cubos, placas, cones, entre outros. Na Ref. [40], há uma sugestão para construção desses modelos em resina de poliéster transpa-

rente ou colorida. Segundo os autores, esse material permite visualizar as trajetórias internas de um feixe de laser emitido por um apontador.

Uma consequência da igualdade do índice de refração entre dois meios é a invisibilidade de um meio em relação ao outro (por exemplo, o desaparecimento de um bastão acrílico em tetracloroetileno). Entretanto, nem sempre essa igualdade é necessária para a invisibilidade [38], pois ao se revisar a explicação de porque uma garrafa de vidro cheia de glicerina desaparece em um recipiente também cheio de glicerina, percebe-se que uma escolha adequada das dimensões desse recipiente já é suficiente para o desaparecimento, o qual não ocorre em recipientes cujas dimensões sejam muito superiores que aquelas encontradas na garrafa.

A lei de Snell é usada não só para explicar a refração, mas também a reflexão total interna, fenômeno que merece atenção especial devido às suas várias aplicações práticas, que vão desde sua utilização em instrumentos ópticos até os mais modernos sistemas de telecomunicações. Esse efeito muitas vezes parece mágico para o aluno, que o vê apenas como um resultado matemático. Um conjunto de demonstrações experimentais é proposto na Ref. [35] para ilustrar o efeito de reflexão total interna e algumas de suas aplicações, como a demonstração da reflexão total em um semicírculo de acrílico, em prismas e em tubos de acrílico que simulam fibras ópticas, a fim de demonstrar para os estudantes as aplicações da refração. A lei de Snell também é a base de outro trabalho [41], onde o índice de refração de uma placa de acrílico é quantitativamente determinado a partir da visualização e determinação do desvio sofrido por um raio de luz incidente sobre uma lâmina de faces paralelas.

Nas obras didáticas, o estudo das lentes é em geral iniciado com a relação entre a geometria da lente (bordas finas ou grossas) e seu comportamento óptico (convergente ou divergente). Como nas situações cotidianas é rara a existência de uma lente cujo índice de refração seja menor que o meio que a envolve, as lentes de bordas finas tendem a se comportar convergentes. Mas em meios com maiores índices de refração, tais lentes tornam-se divergentes [36]. Para demonstrar esse fato, utiliza-se um apontador laser, o bulbo de uma lâmpada comum (lente), glicerina e um aquário retangular com água. Enchendo-se a lâmpada com glicerina (cujo índice de refração é maior que a água) ou deixando-a preenchida apenas com ar (índice de refração menor que a água), pode-se mostrar a trajetória do laser, convergindo ao passar da glicerina para a água e divergindo ao passar do ar para a água [36].

O folclore sobre as lentes convergentes inclui o fato de tais instrumentos poderem ser usados para convergir a luz do sol ou outras fontes de luz em um ponto focal, produzindo uma elevação da temperatura e consequente combustão do material presente nesse ponto. Em [37], são detalhadas as condições em que uma imagem real

pode “queimar” o local de projeção, e apresentam uma experiência simples: a combustão de papel escuro (ou outros objetos) com um retroprojetor. A luz emitida por esse instrumento é fortemente concentrada em um ponto, com um aumento considerável da temperatura, inclusive com risco potencial de queimaduras.

Os limites da “aproximação de lente fina” (ou delgada) são discutidos na Ref. [42], a qual é comumente utilizada nas obras didáticas voltadas para o ensino médio. Utilizando uma notação matricial cuja transposição didática é complexa, os autores demonstram que mesmo para lentes ditas “didáticas”, a aproximação de uma lente real por uma lente delgada (ou seja, de espessura desprezível) pode se revelar errônea, como os resultados experimentais obtidos pelos autores demonstram.

Outro fenômeno citado em livros-texto, mas nem sempre discutido a contento, é a aberração cromática, presente também no estudo das lentes. “A aberração cromática resulta da luz de cores distintas, que possuem diferentes velocidades de propagação e, portanto, sofrem refrações diferentes na lente” [12]. A correção das aberrações cromáticas é fundamental para que fotografias, por exemplo, tenham a qualidade necessária para grandes ampliações. Em [8], vemos que os autores se preocupam em mostrar que, com uma combinação adequada de lentes (nominalmente, um sistema constituído por duas lentes convergentes afastadas de uma distância conveniente ou um sistema constituído por uma lente convergente e outra divergente, justapostas), é possível eliminar ou minimizar a aberração cromática.

Uma aplicação mais direta para as lentes também está presente na literatura [39]: a construção de uma luneta de baixo custo que “permite ver as crateras lunares e seu relevo, principalmente quando observada durante as noites de lua crescente ou minguante” [39]. Na construção do instrumento, usa-se apenas uma lente de óculos (vergência igual a 1 ou 2 dioptrias) como objetiva e um visor de máquina fotográfica como ocular (divergente). A simplicidade da sugestão experimental dos autores torna bastante plausível a sua aplicação em sala de aula.

Outra típica lacuna presente nos livros didáticos quando as lentes são estudadas é complementada na Ref. [43]: o fato do olho (encarado como uma lente convergente) raramente ser levado em conta no estudo dos processos de formação de imagens reais e virtuais. Os autores desenvolvem seu raciocínio a partir de uma pergunta que poderia surgir em sala de aula: se para certas posições do objeto (entre o foco e a lente) uma lente convergente conjuga uma imagem direita, e para outras (além do foco) uma imagem invertida, há uma descontinuidade perceptível quando o objeto passa de uma região para a outra. Através de argumentos geométricos, os autores demonstram que não: na verdade, o observador percebe uma imagem direita (ou seja, captada como invertida na retina) nas duas

situações.

Os livros didáticos costumam apresentar o olho humano como um instrumento óptico [10,24], o que nos parece inconveniente, por ser o olho parte essencial do processo de visão. O reducionismo geométrico acaba reduzindo o olho a uma mera lente convergente de distância focal variável. Os artigos revisados buscam corrigir essa distorção. Percebe-se uma preocupação em comum para tais autores: a simulação ou compreensão dos processos biológicos que acontecem no globo ocular. Propõe-se, por exemplo, a dissecação de um olho bovino para a melhor compreensão da estrutura do globo ocular e do seu funcionamento [32]. Possivelmente, essa atividade pode ser realizada em conjunto com um professor de biologia, como uma tentativa de maior diálogo entre os conteúdos dessas disciplinas.

Uma experiência bastante simples (usando um copo de água e uma vela) para simular o astigmatismo, problema de visão extremamente frequente na população e raramente discutido em livros didáticos, aparece em [33], enquanto em [34] apresenta-se outra experiência, a construção de um simulador didático do cristalino. A realização da experiência é complexa (envolvendo mangueiras e uma bolsa de água), mas simula adequadamente a contração e distensão do cristalino. Em um trabalho posterior [44], são apresentadas aplicações do simulador didático do cristalino na reprodução dos principais defeitos de visão (miopia, hipermetropia e astigmatismo). De acordo com o método proposto, a dinâmica do simulador não só permite reproduzir os defeitos visuais, mas também suas correções, através do uso de lentes de geometrias e distâncias focais apropriadas.

O olho humano é historicamente comparado ao mecanismo de uma máquina fotográfica. A popularização de câmeras digitais de baixo custo na última década levou a uma expansão de artigos recentes propondo a sua utilização em sala de aula, colaborando para que os conhecimentos da refração aplicada às lentes sejam trabalhados. Seja para a medição direta do campo de visão da câmera [45] ou o registro fotográfico das imagens geradas por telescópios ou microscópios [46], a câmera digital se revela um valioso auxílio didático.

3.4. Difração

Nos livros didáticos, a reflexão e a refração são usualmente tratadas nos capítulos dedicados à óptica geométrica, enquanto a difração, a interferência, a polarização e o espalhamento da luz são estudadas após a apresentação inicial da ondulatória. Já o espalhamento, não está presente em nenhum dos livros didáticos consultados [10-12, 24-25].

A difração ocorre quando a luz atravessa fendas ou se desvia de obstáculos de mesma ordem de grandeza do seu comprimento de onda. Os artigos revisados apresentam técnicas experimentais para demonstrar esses

fenômenos aos estudantes, ou interpretações que podem ser feitas de fenômenos naturais a partir da sua compreensão.

Uma dificuldade para o estudo experimental da difração é a disponibilidade reduzida de redes de difração de boa qualidade. Um trabalho [47] tenta minimizar essa dificuldade, ao descrever os resultados da produção didática de redes de difração utilizando uma técnica fotográfica elementar, ao alcance da maioria dos laboratórios de física no ensino médio. De acordo com os autores, as redes obtidas por estudantes nesse nível de ensino são adequadas para a realização de diversos experimentos de difração e discussão de conceitos em ótica, com até 350 linhas por centímetro. Os autores ressaltam ser possível utilizar redes de difração obtidas a partir de CDs e montar pequenos espectroscópios individuais a partir dessas redes. A técnica proposta pelos autores (realizada a partir de fotografias de uma matriz periódica do tipo “claro-escuro”, sendo a rede obtida por redução ótica na objetiva) é mais trabalhosa, mas permite redes de maior qualidade. Outro trabalho [48] apresenta também um outro método trabalhoso, o qual dificilmente poderá ser transposto para o ensino médio, onde é descrita a fabricação de fendas e orifícios em placas de vidro revestidas de cromo, para experiências didáticas sobre difração e interferência, através da técnica de microlitografia. Outra atividade de igual dificuldade de transposição didática para essa etapa educacional, especialmente no tocante à apresentação teórica inicial, é uma montagem experimental para a compreensão do funcionamento das placas de zonas de Fresnel, as quais, quando construídas, atuam como lentes difrativas [49].

O artigo da Ref. [50] também coloca o custo de redes de difração como proibitivo em seu trabalho, e utiliza a técnica de difração de um feixe laser por obstáculo (um fio de cabelo) com o objetivo de determinar o diâmetro deste, propondo também o uso de telas de serigrafia como substitutos adequados a redes de difração, no estudo da difração do laser em fendas. Por outro lado, o artigo da Ref. [51] propõe a utilização de um disco de áudio compacto (*compact-disc*, ou CD) do qual tenha sido retirada a película refletora como rede de difração. A partir da difração de um feixe laser por um CD, pode-se determinar a distância entre as trilhas do mesmo. Se a experiência for repetida com um DVD (*digital video disc*), a distância encontrada será menor, devido à maior capacidade de armazenamento desse disco. Já em [2], sugere-se o uso de um disco CD e um retroprojektor. A diferença básica da técnica descrita nos artigos [2] e [51] é o uso do CD como uma rede de reflexão, usando-o como se ele fosse um espelho, projetando a luz emitida pelo retroprojektor em uma parede. Essa técnica permite obter um espectro de primeira ordem nítido e com pouca distorção, sendo possível identificar até a segunda ordem deste.

A mesma técnica é usada em outro trabalho [52],

que propõem fazer a luz difratada por um CD (novamente sem película refletora) passar por um recipiente com água ou outro líquido, com conseqüente alteração da posição dos máximos de difração, permitindo a medida do índice de refração do líquido utilizado e a discussão da alteração do comprimento de onda da luz em diferentes substâncias. O CD também é o substituto sugerido para as redes de difração em diferentes espectroscópios didáticos propostos [53-56]. O primeiro artigo [53] mostra como um CD pode ser usado para a difração de um feixe laser, e no segundo [54] é sugerido o uso de um retroprojektor como fonte de luz, munido de uma fenda circular, e o CD como rede de difração por transmissão, resultando em uma impressionante e bastante visível figura de difração, permitindo até mesmo medidas precisas da distância entre trilhas adjacentes de um CD. Os dois últimos artigos [55-56] propõem a construção de aparelhos bastante semelhantes, tanto em termos de sua construção quanto na sugestão de aplicação (observação do espectro solar, por exemplo). Finalmente, outro conjunto de experiências propostas também faz uso de CDs [57], com ou sem película refletora, para diversas experiências simples que permitem a constatação da presença da difração em variados fenômenos, além da sua comparação com imagens formadas por refração.

O uso de um apontador laser em experimentos de difração é sugerido para a medida de dimensões dos mais variados objetos [56]: fios de cabelo, orifícios em papel alumínio, telas de serigrafia, discos de vinil, trilhas de CDs, lâminas de barbear e até bigodes de gato e penas de galinha! É interessante observar que a preocupação inicial dos autores era a adaptação de um apontador para tais experiências, as quais demandam um feixe laser fixo, de alta potência e que tenha uma razoável duração. Os apontadores laser disponíveis no mercado na época em que o artigo foi publicado (2002) não possuíam essas características, por serem alimentados por pequenas baterias que se esgotavam rapidamente. O artigo [58] propõe então uma modificação no apontador, para que ele pudesse ser utilizado com pilhas pequenas. Entretanto, à época da realização dessa revisão (2011), já era fácil encontrar no mercado apontadores de cor vermelha de baixo custo, alimentados por pilhas, o que torna a proposta dos autores desnecessária. O preço dos apontadores laser nas cores verde e azul, também tem caído sistematicamente, tornando-os mais acessíveis.

3.5. Interferência

A interferência é um dos mais típicos fenômenos ondulatórios, consistindo na superposição de ondas em um ponto do espaço. A interferência luminosa está associada aos mais diversos fenômenos, tais como as cores observadas em bolhas de sabão ou a leitura óptica de um CD (*compact disc*). Por razões associadas à natureza

do fenômeno, atividades experimentais envolvendo a interferência da luz estão inevitavelmente presentes em vários artigos revisados no tópico dedicado à difração. Os artigos citados no tópico presente dedicam-se predominantemente às demonstrações onde a interferência seja o fenômeno fundamental, sem que a difração da luz esteja presente ou sua influência possa ser desprezada.

Nota-se como uma preocupação comum aos autores a proposição de atividades de baixo custo, com uma notória exceção [59], onde é apresentada uma técnica para a medição do coeficiente de dilatação linear do alumínio com o uso de um interferômetro, o qual analisa a luz refletida e espalhada pelas irregularidades da superfície do metal, em um experimento muito preciso, mas de complexa execução. A título de comparação, em outro artigo [60] é mostrada uma versão didática de baixo custo (cinco reais, de acordo com os autores) do “espelho de Lloyd”, uma popular atividade para demonstrar a interferência da luz. A fonte de luz utilizada é um laser de diodo sem a lente colimadora, resultando em um feixe divergente, e uma lâmina de vidro como espelho. Os resultados obtidos apresentam um forte contraste entre as franjas claras e escuras, permitindo a fácil verificação da interferência entre os feixes de luz. A preocupação com o custo de um aparato experimental também é encontrada em outro trabalho [61], onde a montagem de um interferômetro de Michelson é proposta usando um apontador laser (fonte de luz), uma lâmina espessa de vidro ou plástico (divisor de feixe) e lentes de óculos escuros (espelhos).

Outra experiência de custo igualmente reduzido é a presente na Ref. [62]: a partir do manuseio de um tecido transparente e branco, o “voal”, tipicamente utilizado em cortinas, os autores demonstram ser possível a observação de vários padrões de interferência um simples manuseio do tecido (os ditos padrões de Moiré), além da comparação desses padrões com aqueles observados em situações onde a interferência luminosa ou sonora está presente. Os padrões de Moiré também estão presentes em outro trabalho [63], o qual propõe a representação da interferência de ondas na experiência de Young utilizando lâminas transparentes e um retro-projetor.

Ainda na linha da economia de custos, encontramos aquele que, possivelmente, é o fenômeno que mais desperta interesse nos estudantes e que envolve a interferência: a holografia. O artigo [64] apresenta uma técnica experimental relativamente simples (exceto a obtenção de uma película holográfica, semelhante a um filme de máquinas fotográficas antigas) para se obter hologramas caseiros usando-se apenas um apontador laser comum.

3.6. Polarização

Uma onda luminosa é dita polarizada linearmente quando o campo elétrico dessa radiação oscila em um

único plano. O fato de ser possível obter luz polarizada permitiu a construção de filtros polarizadores para máquinas fotográficas, lentes de qualidade para óculos escuros, monitores de cristal líquido (*liquid crystal display*, ou LCD) e projeções tridimensionais em cinemas. Apesar da onipresença desse fenômeno no estado tecnológico atual, poucos são os artigos que se dedicam a experiências que envolvam a polarização. Apenas três artigos presentes na literatura se dedicam a esse tema.

Uma explicação bastante detalhada do monitor de cristal líquido é apresentada no artigo [65], escrito antes da popularização dessa tecnologia. Os autores propõem que o trabalho teórico seja comparado com a realidade, a partir da desmontagem do visor de cristal líquido de uma calculadora, por exemplo. Já um segundo trabalho [66] propõe uma técnica para a confirmação da polarização de um feixe laser emitido por um apontador, através da análise computacional da intensidade da luz que passa através de uma lente de óculos polarizadora. A escolha da lente de óculos, ao invés de um filtro polarizador tradicional, se deveu à clássica razão para o uso de materiais alternativos: baixo custo. Caso essa variável não seja relevante, uma outra proposta [67] para a verificação da birrefringência da fita *durex* pode ser executada. A experiência, apesar de simples, necessita no mínimo de um banco óptico, polarizadores, um feixe laser e um microscópio óptico. Com tal montagem, também é possível analisar a atividade óptica de uma solução de açúcar.

3.7. Espalhamento

O espalhamento de Rayleigh acontece quando as partículas que interagem com a luz têm um tamanho muito menor do que o comprimento de onda da luz, que é o caso das moléculas de oxigênio (O_2) e nitrogênio (N_2) da atmosfera terrestre [9]. Apesar de ser um fenômeno óptico importante, cujo entendimento propicia a explicação de importantes fenômenos cotidianos (a cor azulada do céu e da íris humana, por exemplo), a carência de transposições didáticas para o espalhamento de Rayleigh é notória. Com uma exceção [12], nenhuma das obras didáticas consultadas trazia informações sobre esse fenômeno.

Essa carência provavelmente serviu como fonte de inspiração para um artigo sobre o tema [68]. O estudo de Lord Rayleigh em 1871 sobre o fenômeno “levou ao desenvolvimento de uma lei geral para a intensidade da luz espalhada aplicável a qualquer partícula de índice de refração diferente daquele do meio no qual está imerso” [68]. O mais importante resultado desse estudo é a dependência de intensidade do espalhamento com o inverso da quarta potência do comprimento de onda. Assim, a luz azul é três vezes mais espalhada pelas moléculas de nitrogênio e oxigênio da atmosfera que a luz vermelha [9]. Esse fenômeno explica a cor azulada do céu, o pôr-do-sol avermelhado e a variação de

cores da lua durante sua trajetória no céu ou mesmo durante eclipses. No trabalho [68], propõe-se a simulação da formação do céu azul e do pôr-do-sol, baseando-se na produção de espalhadores de luz em uma solução aquosa (água contendo uma solução de hidróxido de sódio, na qual se goteja ácido sulfúrico diluído), e a discussão e extrapolação do resultado com os estudantes. Variações desse experimento, com o tradicional intuito de minimizar o seu custo e complexidade, são apresentadas em trabalhos posteriores [69,70].

4. Conclusões e perspectivas

A pesquisa na área de experimentação em óptica mostra sinais de nítido crescimento: entre 1992 e 2000, foram publicados 15 artigos nessa área. Entre 2001 e 2008, esse número cresceu para 32 artigos. A análise dos dados permite concluir que não há uma predileção dos pesquisadores por um tópico específico. Os tópicos referentes à natureza da luz e à refração possuem um destaque um pouco maior, em comparação aos temas da reflexão, difração, interferência e espalhamento, mas não um completo domínio.

Acreditamos que revisões semelhantes à presente deveriam ser produzidas para áreas como a mecânica e o eletromagnetismo, pois cada uma dessas áreas apresenta um número crescente de artigos. As diferentes vertentes da física moderna (relatividade, quântica, contemporânea), cada vez mais presentes na literatura, também são uma área carente em revisões.

Acreditamos que tal fato é motivado pelo maior tempo que é gasto em sala de aula na explicação dos dois primeiros tópicos citados, além do destaque dado a esses temas pelos livros didáticos. Já o espalhamento nem mesmo está presente nos livros-texto consultados, e a difração da luz não ganha muito destaque nessas obras, sendo comumente estudada em conjunto com a difração do som [10,11,22]. Dadas as propostas de experimentação nesses tópicos e sua aplicabilidade, acreditamos que a discussão da difração e do espalhamento não pode ser ignorada. Na ausência de tempo, propomos a supressão de outras partes do conteúdo (como a equação dos pontos conjugados), dado o potencial de aprendizagem que a explicação de fenômenos tão cotidianos pode trazer.

Alguns pontos comuns à maioria dos artigos podem ser citados:

- Elaboração de experiências didáticas a partir de materiais simples, acessíveis e de baixo custo.
- Explicação de fenômenos do cotidiano a partir da discussão conduzida em conjunto com a experiência realizada.
- Complementação de lacunas dos livros-texto.

- Sugestões de discussões que podem ser realizadas durante a aula, a partir da condução dos experimentos sugeridos.

Nossa revisão da literatura demonstra que há uma carência em revisões temáticas na área da experimentação. A necessidade de textos de referência e orientação para pesquisadores de áreas específicas não pode permanecer ignorada, pois a literatura a ser revisada é cada vez mais extensa, dado o sensível aumento de artigos publicados nos anos recentes. Nossa motivação para a condução dessa pesquisa foi justamente apresentar um panorama geral da pesquisa da experimentação em óptica, para que as lacunas existentes na literatura possam ser mais facilmente preenchidas pelos pesquisadores da área, após se familiarizarem com a área temática a partir da leitura de artigos de revisão.

Referências

- [1] M. Araújo e M. Abib, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **25**, 176 (2003).
- [2] F. Catelli, *Caderno Catarinense de Ensino de Física* **16**, 123 (1999).
- [3] J. Salinas e J. Sandoval, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **22**, 259 (2000).
- [4] J. Gircoreano e J. Pacca, *Caderno Catarinense de Ensino de Física* **18**, 26 (2001).
- [5] F. Lima e J. Rocha, *Física na Escola* **5**(1), 22 (2004).
- [6] J. Moreira, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **25**, 62 (2003).
- [7] F. Silveira, R. Axt e M. Pires, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **26**, 19 (2004).
- [8] N. Pionório, J. Rodrigues e A. Bertuola, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **30**, 3315 (2008).
- [9] F. Silveira e M. Saraiva, *Física na Escola* **9**(2), 20 (2008).
- [10] F. Ramalho, N. Ferraro e P. Toledo, *Os Fundamentos da Física 2* (Moderna, São Paulo, 2007), 9ª ed. revista e ampliada, p. 217-372.
- [11] B. Alvarenga e A. Máximo, *Curso de Física, Volume 2* (Scipione, São Paulo, 2005), 6ª ed. revista e ampliada, p. 153-236; 255-265.
- [12] P. Hewitt, *Física Conceitual* (Bookman, Porto Alegre, 2002), 9. ed., p. 440-542.
- [13] R. Viscovini, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **22**, 143 (2000).
- [14] T. Silva, *Física na Escola* **5**(1), 15 (2004).
- [15] F. Silveira e M. Saraiva, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **25**, 228 (2008).
- [16] M. Silva, *Física na Escola* **8**(1), 25 (2007).
- [17] G. Costa, B. Cortese, B. Scurachio e R. Catunda, *Física na Escola* **9**, 25 (2008).
- [18] E. Loreto e P. Sartori, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **25**, 266 (2008).
- [19] E. Camargo, C. Bim, J. Olivo e R. Freire, *Física na Escola* **10**, 36 (2009).

- [20] F. Nascimento e C. Nascimento, *Física na Escola* **11**, 11 (2010).
- [21] M. Saba, R. Rapozo e G. Santana, *Física na Escola* **3**, 12 (2002).
- [22] P. Ourique, O. Giovannini e F. Catelli, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **32**, 1302 (2010).
- [23] F. Silveira e R. Axt, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **24**, 353 (2007).
- [24] J. Bonjorno, R. Bonjorno, V. Bonjorno e C. Ramos, *Física: História & Cotidiano: Termologia, Óptica, Ondulatória, Hidrodinâmica: 2* (FTD, São Paulo, 2004), 1 ed., p. 127-236.
- [25] N. Villas-Bôas, R. Doca e G. Biscuola, *Tópicos de Física 2 - Termologia, Ondulatória e Óptica* (Saraiva, São Paulo, 2001), 16 ed. P. 314-496.
- [26] F. Silveira e R. Axt, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **24**, 353 (2001).
- [27] F. Catelli e C. Reis, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **21**, 115 (2004).
- [28] F. Catelli e S. Vicenzi, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **21**, 392 (2004).
- [29] T. Bernardes, R. Barbosa, A. Batagin, G. Iachel, M. Pinheiro e R. Scalvi, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **28**, 391 (2006).
- [30] T. Bernardes, G. Iachel e R. Scalvi, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **25**, 103 (2008).
- [31] L. Paula, P. Raggi e A. Assis, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **24**, 338 (2007).
- [32] M. Saba e I. Epiphanyo, *Física na Escola* **2**(2), 16 (2001).
- [33] H. Cardoso e J. Mendes, *Física na Escola* **3**(2), 5 (2002).
- [34] A. Guedes, L. Braun e M. Rizzati, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **22**, 137 (2000).
- [35] R. Mendonça, L. Misoguti, R. Muniz, M. Tuboy e V. Bagnato, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **20**, 296 (1998).
- [36] J. Pimentel, *Caderno Catarinense de Ensino de Física* **16**, 349 (1999).
- [37] F. Catelli e V. Franco, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **23**, 439 (2006).
- [38] C. Laburú e H. Silva, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **21**, 111 (2004).
- [39] J. Canalle e A. Souza, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **22**, 121 (2005).
- [40] J. Vuolo e C. Furukawa, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **21**, 280 (1999).
- [41] B. Santana e F. Cruz, *Física na Escola* **9**(1), 40 (2008).
- [42] N. Carlin, E. Szanto, F. Jorge, F. Souza, I. Bechtold e I. Seale, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **29**, 299 (2007).
- [43] F. Silveira e R. Axt, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **28**, 421 (2006).
- [44] A. Guedes, L. Braun e M. Rizzati, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **23**(1), 53 (2001).
- [45] F. Catelli e P. Ourique, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **26**, 314 (2009).
- [46] F. Catelli, M. Andrezza O. Giovannini e F. Silva, *Física na Escola* **9**(2), 38 (2008).
- [47] H. Kalinowski, O. Dummer e E. Giffhorn, *Caderno Catarinense de Ensino de Física* **18**, 248 (2001).
- [48] J. Vuolo, V. Mammana e J. Martins, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **22**, 54 (2000).
- [49] M. Muller, J. Silva e J. Fabris, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **27**, 603 (2005).
- [50] C. Laburú e E. Lopes, *Caderno Catarinense de Ensino de Física* **18**, 240 (2001).
- [51] I. Costa, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **24**, 333 (2007).
- [52] F. Silva e M. Muramatsu, *Física na Escola* **8**(1), 46 (2007).
- [53] M. Cavalcante, V. Jardim e J. Barros, *Caderno Catarinense de Ensino de Física* **16**, 154 (1999).
- [54] F. Catelli e H. Libardi, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **32**, 2307 (2010).
- [55] M. Cavalcante e C. Tavolaro, *Física na Escola* **3**(2), 40 (2002).
- [56] F. Catelli e S. Pezzini, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **19**, 339 (2002).
- [57] J. Lunazzi e D. Magalhães, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **31**, 2501 (2009).
- [58] F. Catelli e S. Vicenzi, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **19**, 393 (2002).
- [59] F. Silva e M. Muramatsu, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **29**, 283 (2007).
- [60] F. Catelli e F. Lazzari, *Física na Escola* **5**(2), 20 (2004).
- [61] F. Catelli e S. Vicenzi, *Caderno Catarinense de Ensino de Física* **18**, 350 (2001).
- [62] P. Ramos e R. Souza, *Física na Escola* **5**(2), 23 (2004).
- [63] A. Dornelles, *Caderno Catarinense de Ensino de Física* **15**, 87 (1998).
- [64] A. Yeras, D. Magalhães, M. Muramatsu e J. Lemus, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **32**, 3502 (2010).
- [65] C. Laburú, A. Simões e A. Urbano, *Caderno Catarinense de Ensino de Física* **15**, 192 (1998).
- [66] M. Cavalcante e C. Tavolaro, *Física na Escola* **7**(2), 73 (2006).
- [67] N. Carlin, E. Szanto, I. Seale, F. Jorge, F. Souza, I. Bechtold e L. Gasques, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **27**, 349 (2005).
- [68] S. Krapas e P. Santos, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **19**, 341 (2002).
- [69] A. Ortiz, C. Laburú, O. Silva, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **27**, 599 (2010).
- [70] M. Rocha, R. Fujimoto, R. Azevedo e M. Muramatsu, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **32**, 3501 (2010).