



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE CIÊNCIAS E MATEMÁTICA**  
**MESTRADO PROFISSIONAL**



**SAMIA ABADIA DANTAS**

**IMAGENS HOLOGRÁFICAS COMO TEMA**  
**GERADOR PARA ABORDAGEM DOS FENÔMENOS**  
**DE INTERFERÊNCIA E DIFRAÇÃO DA LUZ**

Uberlândia  
2016



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE CIÊNCIAS E MATEMÁTICA**  
**MESTRADO PROFISSIONAL**



**SAMIA ABADIA DANTAS**

**IMAGENS HOLOGRÁFICAS COMO TEMA  
GERADOR PARA ABORDAGEM DOS FENÔMENOS  
DE INTERFERÊNCIA E DIFRAÇÃO DA LUZ**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Ensino de Ciências e Matemática – Mestrado Profissional, da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito para obtenção do título de mestre em Ensino de Ciências e Matemática.  
Orientação: Prof.a Dra. Débora Coimbra.

Uberlândia  
2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

---

- D192i  
2016
- Dantas, Samia Abadia, 1980-  
Imagens holográficas como tema gerador para abordagem dos fenômenos de interferência e difração da luz / Samia Abadia Dantas. - 2016.  
185 p. : il.
- Orientadora: Débora Coimbra.  
Dissertação (mestrado profissional) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências e Matemática.  
Inclui bibliografia.
1. Ciência - Estudo e ensino - Teses. 2. Interferência (Luz) - Teses. 3. Polarização (Luz) - Teses. 4. Física - Estudo e ensino - Teses. I. Coimbra, Débora. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências e Matemática. III. Título.

---

CDU: 50:37

Para meus amados Samuel e Serginei, que figuram como fonte de inspiração na minha busca contínua por aperfeiçoamento pessoal e profissional e na superação de toda e qualquer dificuldade que a vida me apresente.

## AGRADECIMENTOS

Todos que me acompanham de perto sabem que esta jornada não foi fácil, pois ao mesmo tempo em que ingressei no mestrado ingressei também na vida materna, dois sonhos de longa data que começavam a ser realizados juntos.

Foram muitos os responsáveis pela realização deste sonho e me reservo o direito de agradecer a cada um, ainda que me desvie do texto acadêmico. Em virtude das modificações (extremas) da dinâmica diária, não seria possível tal realização sem a contribuição de cada um.

Primeiramente agradeço a minha orientadora Débora Coimbra que, além de não poupar esforços para desempenhar sua função, foi muito além tendo sempre a palavra certa para me incentivar quando era de um empurrão que eu precisava, para me acalmar quando a ansiedade estava exagerada ou até os puxões de orelha quando estes eram necessários. Também não é possível esquecer as muitas conversas que tivemos sobre todos os temas possíveis e imagináveis. Tudo isso lhe garantiu o direito ao título de mãe, mas para evitar ciúmes da Tamara digamos que ela seja a minha mãe acadêmica.

Muito obrigada à minha amiga Dayane pela valiosa ajuda na finalização das disciplinas durante a minha licença maternidade e pelos maravilhosos momentos de descontração, juntamente com a Carol e a Kelen, tão importantes para suavizar os obstáculos do caminho e auxiliar na renovação das energias.

Agradeço também a equipe de direção e supervisão da E. E. Professor José Ignácio de Sousa que tanto colaborou na execução das atividades e aos meus alunos pela prontidão em participar das mesmas.

À colega de trabalho Lorena, que se tornou amiga, obrigada pelo valioso auxílio no refinamento das atividades para a composição da sequência final.

Muito obrigada à Tamara, pela edição da capa do produto, tradução do resumo e pelo auxílio na organização de materiais desde o exame de qualificação.

Obrigada à minha família que acreditou em mim, mesmo quando eu cheguei a duvidar. Aos meus pais, obrigada pela formação inicial que me conduziu a este caminho, e pelo apoio incondicional. Ao meu irmão e às minhas irmãs, agradeço a participação ativa na formação do meu caráter e personalidade e pelo incentivo em todo momento.

Ao meu esposo, Serginei, agradeço pelo companheirismo e apoio incondicionais. Ao meu filho, Samuel, agradeço por cada sorriso e cada carinho que, mesmo após inúmeras noites mal dormidas, conseguiam despertar em mim a vontade de melhorar e me superar a cada dia.

Agradeço ainda a FAPEMIG pelo auxílio financeiro que possibilitou a participação em vários eventos da área de ensino e à Secretaria de Planejamento e Gestão do Estado de Minas Gerais pela concessão da licença durante o ano de 2015, fundamental na aplicação e análise da sequência final.

Por fim, agradeço a Deus, por ter colocado cada uma dessas pessoas no meu caminho.

“E tudo um dia vira luz.  
E toda vez que falta luz,  
o invisível nos salta aos olhos.”

Humberto Gessinger

## RESUMO

Este trabalho apresenta a elaboração de uma sequência didática para abordagem dos fenômenos de difração, interferência e polarização da luz, os quais só podem ser compreendidos tendo em vista o comportamento ondulatório da luz. Utilizando as imagens holográficas como tema gerador, a sequência inclui o tratamento dos conceitos iniciais da ondulatória, como amplitude, comprimento de onda e frequência, necessários ao tratamento operacional dos fenômenos pretendidos.

A sequência foi aplicada junto a cerca de 300 alunos do segundo ano do ensino médio regular matutino de uma escola estadual localizada na cidade de Uberlândia-MG. Fundamentada na teoria dos campos conceituais de Vergnaud, foi concebida de forma que apresentasse uma variada gama de situações, permitindo aos estudantes vivenciá-las e dominá-las progressivamente.

A discussão dos conteúdos foi subsidiada na projeção de slides, o que possibilitou atividades como análise de imagens, vídeos e animações e execução de simulações. Atividades de manipulação de material lúdico também foram realizadas e oportunizaram a participação ativa dos estudantes nos diálogos das características do movimento ondulatório, da relação funcional entre suas grandezas características e das representações de interesse neste trabalho. Para o tratamento matemático das ondas, visando a interpretação de expressões matemáticas e a construção e a interpretação de gráficos, optamos pelo uso do software *Modellus*, pela sua facilidade de manipulação e distribuição livre. Questionários foram aplicados em diversos momentos, incluindo um inicial e um após as avaliações bimestrais regulares.

Nossos resultados apontam que as atividades executadas promoveram participação e envolvimento efetivos dos estudantes, mesmo aquelas de forte cunho matemático. Apesar de o processo de criação das imagens holográficas não ter sido plenamente compreendido pela maioria dos estudantes (o que seria de se esperar dada a sua complexidade), as respostas aos questionários indicam uma compreensão das características das ondas e dos fenômenos ondulatórios de interesse. Além disso, pudemos constatar nas respostas uma desmistificação do processo tecnológico de criação dos hologramas e da figura do cientista como “gênio”, para o qual o conhecimento seria dado de forma “divina”.

Diante da validação da sequência proposta, a mesma foi disposta em forma de um guia didático, destinado ao professor, o qual apresenta uma ampliação da discussão conceitual e detalha os procedimentos metodológicos. Este material foi produzido almejando contribuir no tratamento desses conteúdos, para que figurem no currículo real da Física da educação básica. A sequência proposta visa aprimorar os esquemas de raciocínio dos estudantes, tanto do ponto de vista da articulação dos conceitos como sob o aspecto das representações matemáticas.

Acreditamos que um trabalho assim pode subsidiar a abordagem futura de assuntos como a geração e a propagação de sinais sonoros ou, temas de física moderna como a dualidade onda-partícula.

Palavras chave: modelo ondulatório, interferência da luz, difração da luz, polarização da luz, teoria dos campos conceituais.

## ABSTRACT

The development of a teaching learning sequence is reported to approach the light diffraction, interference and polarization phenomena, which can only be understood in view of the wave behavior of light. Taking the holographic images as a subject, the sequence includes the treatment of key concepts such as amplitude, wave length and frequency, required for the desired operativity of the models.

The sequence was applied within about 300 students of the second year of morning regular High School in a public school located in Uberlandia, Minas Gerais, Brazil. Based on the theory of conceptual fields by Vergnaud, it was conceived in order to present a wide range of situations, allowing students to experience and dominate them, progressively.

The discussion of contents was supported in the projection of slides, allowing activities such as analysis of images, videos and animations and running simulations. Ludic materials handling activities were also carried out and allowed the full participation of students in the dialogues about the characteristics of wave motion, the functional relationship among their physical quantities and representations of interest in this work. For the mathematical treatment for the waves, seeking the interpretation of mathematical expressions, and the construction and interpretation of graphs, we have chosen to apply the *Modellus* software for its easy handling and free distribution. Questionnaires were answered at different moments, including an initial and a final ones, the last after the regular bimonthly assessments.

Our results indicate that the activities performed promoted effective participation and involvement of students, even when the topics with a strong mathematical nature were considered. Although the process of creating holographic images have not been deeply understood by the major part of the students, something which would be expected given the complexity of the issue, the questionnaire answers pointed out an understanding of the characteristics of the wave phenomena of interest. In addition, we found the answers evincing a demystification process technology creation of holograms and the scientist's figure as a “genius”, for which the knowledge would be given in a “divine form”.

On the validation of the proposed sequence, it was drafted in the form of a didactic guide for the teacher, which shows an enlargement of the conceptual discussion and details the methodological procedures. This material has been produced aiming to contribute to the approach of these contents, that really appear in the actual curriculum of Physics for the basic education. The following proposal aims to improve the reasoning schemes of the students, from both: the articulation point of view of concepts and the aspect of mathematical representations.

We believe that this work can provide a future approach to issues as generation and propagation of sound signals or modern physics topics as wave-particle duality.

Key words: wave model, light interference, diffraction of light, polarization of light, theory of conceptual fields

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>2. CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS .....</b>	<b>14</b>
2.1. Interferência e Difração: aporte histórico e significado físico .....	14
2.2. Interferência e Difração nos livros didáticos do PNLD .....	30
2.3. Teoria dos Campos Conceituais .....	36
<b>3. METODOLOGIA.....</b>	<b>41</b>
3.1. Estudo Piloto .....	44
3.2. Sequência Final .....	53
<b>4. RESULTADOS .....</b>	<b>58</b>
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>95</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>97</b>
<b>APÊNDICE – Luz: Fenômenos físicos e a Matemática das ondas .....</b>	<b>101</b>

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - (A) Ilustração de Huygens em sua obra “Tratado sobre a luz” para explicar os pontos da chama provocando vibrações no éter. (B) Retrato de Huygens. Fonte: FORATO, 2009, p.49. ....	17
Figura 2 - Propagação de uma onda plana no vácuo de acordo com o princípio de Huygens. Fonte: HALLIDAY, RESNICK, 2009, p. 77. ....	18
Figura 3 - esquema indicando as grandezas relevantes para a análise da interferência na fenda dupla. (Fonte: <a href="http://www.ebah.com.br/content/ABAAABKz4AJ/interferencia-por-fenda-dupla-young">http://www.ebah.com.br/content/ABAAABKz4AJ/interferencia-por-fenda-dupla-young</a> ).....	19
Figura 4 - esquema detalhado para análise geométrica da interferência na fenda dupla. (Fonte: <a href="http://www.ebah.com.br/content/ABAAABKz4AJ/interferencia-por-fenda-dupla-young">http://www.ebah.com.br/content/ABAAABKz4AJ/interferencia-por-fenda-dupla-young</a> ) .....	20
Figura 5 - Difração num orifício circular (Fonte: NUSSENZVEIG, 1998).....	24
Figura 6 - Formação do primeiro mínimo de difração (HALLIDAY e RESNICK, 2009, p.113). ....	26
Figura 7 - Como $D \gg a$ , os raios $r_1$ e $r_2$ são paralelos. (HALLIDAY e RESNICK, 2009, p.114).....	27
Figura 8 - raios provenientes do ponto superior de quatro regiões de largura $a/4$ interferindo destrutivamente. Como $D \gg a$ , os raios $r_1$ , $r_2$ , $r_3$ e $r_4$ são paralelos (HALLIDAY e RESNICK, 2009, p.114). ....	28
Quadro 1 - Coleções para apresentação dos dados levantados nos livros didáticos.....	32
Tabela 1 - Quantidade de páginas, ilustrações e esquemas, equações, gráficos e exercícios dedicados aos conteúdos de interferência e difração em cada coleção indicada pelo PNLD 2015 (BRASIL, 2014). ....	34
Quadro 2 - Organização do estudo piloto: atividades propostas e atividades esperadas dos discentes. ....	42
Figura 9 - Representação do espectro eletromagnético.....	45
Figura 10 - Representação de ondas sonoras e suas diferentes faixas de frequência. (Fonte: <a href="http://www.aulas-fisica-quimica.com/8f_07.html">http://www.aulas-fisica-quimica.com/8f_07.html</a> ) .....	45
Figura 11 - (A) Representação da criação do registro holográfico da imagem de um objeto e da (B) reprodução da mesma a partir do registro. (Fonte: Ciência e Natureza: Forças Físicas, 1996. p.124 e 125.) .....	51
Figura 12 - Montagem para produção de hologramas utilizada no Laboratório de Óptica da UNICAMP (Fonte: <a href="http://www.ifi.unicamp.br/~dfigueir/holosite/holografia/holografia.htm">http://www.ifi.unicamp.br/~dfigueir/holosite/holografia/holografia.htm</a> acesso em 15/09/2014) .....	52
Figura 13 - Hologramas da exposição de holografias do Laboratório de Óptica da Unicamp (Fonte: <a href="http://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/expo.htm">http://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/expo.htm</a> acesso em 15/09/2014) .....	52
Quadro 3 - Organização da sequência final: atividades propostas e atividades esperadas dos discentes .....	53
Quadro 4 - Invariantes e Representações mobilizados para cada situação da sequência. ....	58
Figura 14 - Gráficos desenhados pelos grupos (A) G2A, (B) G1G e (C) G7C.....	69
Figura 15 - Representações da onda resultante da interferência de ondas com frequências diferentes dos grupos (A) G4C e (B) G1B.....	73

Figura 16 - Gráfico desenhado pelo grupo G8A para o fenômeno batimento. ....	73
Figura 17 - Gráficos do batimento desenhados pelos grupos (A) G3A e (B) G5H.....	74
Figura 18 - Gráficos do batimento dos grupos (A) G1G e (B) G7H.....	74
Figura 19 - Gráficos da intensidade da luz que atinge um anteparo após sofrer difração feitos pelos grupos (A) G2F e (B) G6A. ....	79
Tabela 2 - Quantidade de alunos que participaram das atividades, que responderam ao questionário preliminar e ao final e a quantidade que considera que houve mudança, por turma e total. ....	83
Figura 20 - Representação da onda na água, feita pelo aluno H32. ....	85
Figura 21 - Gráfico comparativo da quantidade de alunos que soube explicar o que caracteriza uma onda como mecânica ou eletromagnética, por turma. ....	86
Figura 22 - Quantidade de alunos que descreveram corretamente a amplitude, o comprimento da onda, frequência e período em cada turma. ....	87
Figura 23 - Representação dos alunos (A) H34 e (B) C15 para a amplitude e o comprimento de uma onda.....	87
Figura 24 - Quantidade de vezes que cada um dos fenômenos foi lembrado pelos alunos.....	88
Figura 25 - Representações do aluno H34 para a (A) reflexão e a (B) refração. ....	89
Figura 26 - Desenhos feitos pelos alunos (A) C9 e (B) E7 para representar a interferência.....	89
Figura 27 - Desenhos dos alunos (A) H34 e (B) C9 para a difração.....	89
Figura 28 - Desenho do estudante F13 para a difração, mostrada aqui como encurvamento da onda..	90
Figura 29 - Desenho do aluno D5 para representar a polarização.....	90
Tabela 3 - Alunos que descreveram apenas a criação do registro do holograma, apenas a forma de reprodução da imagem ou atribuiu o fenômeno a algum equipamento especial e altamente tecnológico. ....	91
Figura 30 - Desenho da aluna D1 representando o processo de criação do registro holográfico. ....	92
Figura 31 - Atividades realizadas durante a aplicação da sequência mais lembradas pelos alunos, por turma. ....	93

## 1. INTRODUÇÃO

Luz e imagem são fenômenos centrais na vida moderna. A associação de ambos é essencial na comunicação via a linguagem audiovisual (KANTOR et al., 2010). Há um bom tempo, é cotidiana a transmissão de informações por centenas de quilômetros, por meio das ondas. As mensagens digitais podem ser produzidas e codificadas pelo ato alternado de ligar e desligar um feixe laser intenso em intervalos incrivelmente curtos, produzindo ondas de oscilações regulares. Além da transmissão de informação, os fenômenos ondulatórios tem papel de destaque em muitas tecnologias modernas, como, por exemplo, aquelas que se relacionam com a conversão e a transmissão de energia. Esse caráter ondulatório tem como principal assinatura a propriedade de superposição de ondas. O tratamento ondulatório da luz é uma demanda da sociedade moderna e, portanto, da escolarização básica da atualidade.

O entendimento da luz e da sua interação com a matéria foi importante não só para o avanço do conhecimento, mas também para a melhoria da qualidade de vida das pessoas, uma vez que existem aplicações da luz em diversas áreas da saúde como estética, oncologia, controle ambiental e o entendimento da visão (BAGNATO e PRATAVIEIRA, 2015).

Tamanha é a importância da conscientização sobre a luz e as tecnologias advindas do seu conhecimento, que o ano de 2015 foi proclamado na Assembleia Geral das Nações Unidas, como o Ano Internacional da Luz, e das Tecnologias baseadas em Luz.

Como vemos, não faltam razões para entendermos bem a luz, sua interação com a matéria e todas suas consequências. Da mesma forma que a luz é fundamental para manter a natureza funcionando e gerando vida, ela também pode ser usada de forma adicional para resolver problemas e tornar a vida de todos melhor.  
(BAGNATO e PRATAVIEIRA, 2015, p. 4206-7)

Segundo as Orientações Curriculares Nacionais (BRASIL, 2006), a natureza da luz, sua geração e a transmissão de informações através de ondas eletromagnéticas, assim como a interação entre radiação e matéria devem integrar o corpo de conhecimento da disciplina Física em nível médio. O documento apresenta um esquema articulando conceitos e fenômenos associados aos temas e conclui sua abordagem com a seguinte recomendação:

Embora a forma de apresentação sugira uma sequência didática única a ser trilhada pelo professor, há um grande número de possíveis caminhos a serem seguidos, os quais dependem dos objetivos de ensino, das particularidades de cada escola e do projeto político-pedagógico vigente. Assim, a seleção, a priorização e a organização

de um determinado caminho serão tarefas do professor, cujas metas estarão focalizadas numa proposta mais ampla: a autonomia crítica do sujeito, amparada nas especificidades do contexto de cada instituição de ensino.

(BRASIL, 2006, p.60)

Buscando uma forma de abordar o comportamento ondulatório da luz que pudesse despertar o interesse dos alunos e tendo em vista as recomendações dos documentos oficiais, nos ocorreu a ideia de utilizar as imagens holográficas como tema gerador. Essa escolha se mostrou pertinente, pois, além do provável interesse que despertaria nos estudantes, ainda exigiria conhecimentos sobre interferência e difração para sua compreensão, cuja explicação só é possível considerando o modelo ondulatório para o comportamento da luz.

Os recursos audiovisuais, como vídeos, animações e simuladores, foram sendo incorporados à proposta à medida que percebíamos a necessidade dos estudantes de visualizarem as representações para os conteúdos e a dificuldade dos mesmos na interpretação da luz, enquanto onda eletromagnética.

Desde o início, considerávamos importante realizar a análise matemática dos elementos da onda, da superposição de duas ondas como a soma direta de suas equações e da curva da intensidade da luz ao incidir em anteparo após sofrer difração em um obstáculo ou fenda.

Conforme preconizam os Parâmetros Curriculares Nacionais (BRASIL, 2000), a escola deve possibilitar aos estudantes integrarem-se ao mundo contemporâneo nas dimensões da cidadania e do trabalho e, para isso, acreditamos que seja fundamental a incorporação de novas tecnologias ao ambiente escolar. De acordo com Schaff (1990, apud CARDOSO e DICKMAN, 2012), a inserção dos computadores no meio social os transforma em fonte de opções para novas descobertas. Dessa forma, as escolas precisam se adequar, incorporando meios tecnológicos que possibilitem a aprendizagem por meio de metodologias contextualizadas à sociedade moderna.

Aliando a necessidade de análise matemática ao uso de recursos tecnológicos, já havíamos definido que o software *Modellus* seria utilizado, pela sua facilidade de manipulação e distribuição livre.

É importante destacar que a aplicação da sequência didática não tem fim em si mesma, de forma que os resultados quantitativos sobre a compreensão dos conceitos não são nosso principal objetivo. Esta aplicação visa validar as atividades propostas como capazes de

promover a participação e o envolvimento dos estudantes de forma que a unidade didática posposta possa auxiliar outros professores da educação básica no tratamento desses conceitos.

A dissertação está organizada em cinco capítulos. O Capítulo 2 apresenta o arcabouço teórico segundo o qual o trabalho foi desenvolvido e aplicado. Assim, apresentamos inicialmente os significados físicos dos fenômenos de interferência e da difração, destacando a perspectiva histórica para o conhecimento pleno dos fenômenos luminosos. Analisamos, também como os livros didáticos disponíveis para a escolha dos professores de física das escolas públicas brasileiras abordam tais fenômenos. Tal análise é feita à luz da teoria de Chevallard, que trata das transformações que o saber está sujeito no caminho do meio científico ao meio escolar. A seguir, apresentamos elementos essenciais da teoria dos Campos Conceituais de Gerard Vergnaud, pois esta fundamenta a elaboração e a aplicação da sequência didática.

No Capítulo 3, são apresentadas as situações e suas respectivas metodologias pensadas para o trabalho implementado na sala de aula. A descrição das atividades desenvolvidas nos dois momentos de aplicação: o estudo piloto e a sequência final é aqui detalhada também.

O Capítulo 4 é destinado à análise dos resultados da aplicação da sequência final. Nos resultados, estão incluídos os invariantes operatórios pensados para as situações propostas em forma de operações de raciocínio, conceitos-em-ação e teoremas-em-ação. As principais questões levantadas pelos estudantes ao longo das aulas e uma análise das respostas dadas pelos alunos aos questionários preliminar e final são discutidas sob a perspectiva do referencial teórico adotado.

Nossas considerações finais sobre o trabalho são apresentadas no Capítulo 5.

O Apêndice traz o produto em si, um guia para o professor detalhando a unidade didática sobre a abordagem dos fenômenos da difração e da interferência tendo as imagens holográficas como tema gerador e tendo em vista os aspectos conceituais e metodológicos. Tal unidade foi estruturada explicitando nossas experiências na execução deste trabalho, almejando que as mesmas possam contribuir no tratamento desses conteúdos, para que estes figurem no currículo real da Física da educação básica.

## 2. CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS

Neste Capítulo, inicialmente, apresentamos considerações sobre os fenômenos de difração e interferência, incluindo aspectos históricos na consolidação dos modelos explicativos para esses fenômenos. Analisamos, também, como os fenômenos referidos são apresentados nos livros didáticos no Programa Nacional do Livro Didático para o Ensino Médio – PNLD, tendo como perspectiva teórica a proposta da transposição didática de Chevallard, a qual trata das transformações que um saber sofre ao passar do meio científico para o educativo e, posteriormente, para a sala de aula da escola. Em seguida, abordamos elementos essenciais da teoria dos campos conceituais de Vergnaud, referencial sobre o qual se apoia a intervenção didática implementada.

### 2.1. Interferência e Difração: significado físico e um breve aporte histórico

Desde as antigas civilizações, o homem tenta entender o que é a luz e quais os fenômenos a ela relacionados. Alguns filósofos gregos não dissociavam a luz e a visão. Segundo Salvetti (2008, p.17), para os gregos, *a luz era uma coisa intrinsecamente ligada à nossa capacidade visual*. Os gregos interpretavam a luz refletida pelos olhos das pessoas e animais à noite, quando iluminados pelo fogo, como emanada dos próprios olhos para possibilitar a visão. Para Pitágoras (582 – 500 a.C.), um modelo para a visão era o de que a mesma é comparável ao tato, pois a luz saía dos olhos para tocar os objetos e voltaria aos olhos, portando as informações dos objetos tocados. Ainda de acordo com o autor, os humanos não enxergariam bem à noite devido à baixa intensidade de sua chama nos olhos, a qual, durante o dia era somada à luminosidade do ambiente no caminho de ida e volta entre os objetos e os olhos.

Já Demócrito (c460 – 370 a.C.) comparava a visão ao olfato. Para ele, os objetos visíveis emitiam “véus de matéria” que continham a sua forma e seriam percebidos pelos olhos; e Empédocles (493 – 430 a.C.) desenvolveu uma teoria baseada nos quatro elementos fundamentais, segundo a qual os olhos seriam formados internamente pelo fogo. Para ele, os corpos luminosos emitiam algo que encontrava os raios emanados dos olhos (SALVETTI, 2008). Platão (c427 – 347 a.C.) considerava que os raios se originavam nos olhos e interagiam com a emissão dos objetos na presença de luz solar (FORATO, 2009).

De acordo com Carvalho (2005), para outro filósofo grego, Aristóteles (384-322 a.C.), a luz seria uma espécie de fluído imaterial que chega aos olhos vindo dos objetos visíveis.

Euclides (330 – 270 a.C.) defendia que a luz era proveniente do olho. Fazendo uso do raio pitagórico-platônico e associando-o a uma linha reta, Euclides tornou possível uma geometrização da visão, exercendo grande influência no desenvolvimento da óptica geométrica e oferecendo recursos para solução de problemas práticos em diversos campos, como na cenografia, arquitetura e escultura (RODRIGUES NETO, 2013). Euclides, além da propagação retilínea, descreveu a lei da reflexão da luz (SALVETTI, 2008). De acordo com Carvalho (2005), Claudio Ptolomeu (90 – 168) tinha concepções semelhantes às de Euclides e fez estudos sobre campo visual e refração da luz.

Não foram apenas os gregos a se ocupar da luz e de seu comportamento. Chineses e árabes também conheciam alguns princípios da Óptica. Os primeiros utilizavam espelhos côncavos como queimadores e o árabe Ibn Al-Haytham (965 – 1039), conhecido como Alhazen, fez vários estudos nessa área. O árabe deu explicações coerentes sobre alguns fenômenos ópticos e é atribuído a ele o conceito de raio de luz (CARVALHO, 2005). Foi ele quem questionou a ideia de que a luz saía dos olhos argumentando que se é necessário fechar as pálpebras ao olhar para o Sol é por que algo está entrando e não saindo. Sua obra foi traduzida para o latim no final do século XII e exerceu grande influência na óptica ocidental (FORATO, 2009).

Robert Grosseteste (1168 – 1253), para o qual a luz seria uma substância física que se propagava a partir da fonte (CARVALHO, 2005), estudou e organizou os trabalhos de Alhazen nas décadas de 1220 e 1230, inspirando Roger Bacon (1214 – 1294) a reordenar as fontes de forma tão eficiente que viria a determinar o desenvolvimento futuro deste campo de estudo (FORATO, 2009).

Segundo Carvalho (2005), Leonardo da Vinci (1452 – 1519) foi levado, pelo seu interesse mais científico que artístico pela luz, a estudar fenômenos ópticos e a conceber a câmara escura – caixa de paredes opacas com um pequeno orifício em uma delas que, quando se posiciona um objeto externamente diante do orifício forma uma imagem invertida desse objeto na face interna oposta ao orifício – precursora das máquinas fotográfica e filmadora.

Os estudos para o comportamento da luz de Galileu Galilei (1564 – 1642), Johannes Kepler (1571 – 1630) e Francis Bacon (1561 – 1626) forneceram grandes contribuições para o

desenvolvimento das teorias explicativas sobre a natureza da luz de René Descartes (1596 – 1651), Isaac Newton (1642-1727) e Christiaan Huygens (1629-1695).

René Descartes não admitia a ação à distância nem a existência de espaços vazios, explicando todos os fenômenos naturais em termos de matéria e movimento. Na sua concepção, a luz seria a matéria luminosa, um dos elementos de matéria existente, o mais sutil e que se propagaria através do éter. Este último seria também sutil, transparente e invisível formando imensos vórtices que circundavam os planetas (feitos do terceiro tipo de matéria – opaca e densa). A luz seria um tipo de pressão transmitida instantaneamente através do éter pelo espaço (FORATO, 2009).

Bem como a filosofia cartesiana, o atomismo baseado principalmente na obra de Pierre Gassendi (1592 – 1655) explicava os fenômenos naturais em termos de matéria e movimento, com a diferença de que o segundo defendia a existência de espaços vazios. Segundo Forato (2009), para os atomistas, a luz seria constituída de pequenas partículas que se deslocavam em alta velocidade, tornando dispensável a ideia do éter.

Em 1655, surge um fenômeno interessante. O padre Francesco Grimaldi (1618-1663) observou, em seus experimentos, que havia luz na região da sombra geométrica de um objeto delgado, provocada por uma forte luz ao atravessar um pequeno orifício. Ele chamou o fenômeno de difração (a luz se fracionaria em duas partes) e sua concepção da luz é essencialmente ondulatória. Para explicar a difração, fez uma analogia às ondas na água que são difratadas ao passar por um barco. Sua concepção ondulatória da luz permitiu explicar a formação de cores quando a luz atravessa um prisma, considerando que as diferentes cores seriam resultado das diferentes velocidades do movimento vibratório do fluído, o qual atuaria sobre o olho da mesma forma que as diferentes velocidades vibrações do ar levam a uma diversidade de sons (CARVALHO, 2005).

Carvalho (2005) também aponta que Robert Hooke (1635-1703) fez referência à transversalidade do movimento ondulatório para relacionar o movimento vibratório às cores, mas essa ideia não foi aceita na época nem pelos defensores da teoria ondulatória da luz, dentre os quais Christiaan Huygens (1629-1695). Da mesma forma que Hooke, Huygens (Figura 1 B) imaginava a luz como pulsos independentes que se propagavam no éter de forma análoga à propagação do som no ar. Com essa teoria de frentes de ondas<sup>1</sup>, representadas na

---

<sup>1</sup> Uma frente de onda é o lugar geométrico de pontos que apresentam a mesma fase, isto é, pertencem todos à mesma crista de onda (NUSSENZVEIG, 1998).

Figura 1 A, ele conseguiu explicar fenômenos como a propagação retilínea da luz, a reflexão e a refração (FORATO, 2009).



Christiaan Huygens (1629-1695)

Figura 1 - (A) Ilustração de Huygens em sua obra “Tratado sobre a luz” para explicar os pontos da chama provocando vibrações no éter. (B) Retrato de Huygens. Fonte: FORATO, 2009, p.49.

Em seu “Tratado sobre a luz”, de 1690, Huygens apresenta uma explicação baseada no conceito de frente de ondas, atualmente conhecido como Princípio de Huygens, afirmando que

na propagação destas ondas, cada partícula do éter não só transmite o seu movimento à partícula seguinte, ao longo da reta que parte do ponto luminoso, mas também a todas as partículas que a rodeiam e que se opõem ao movimento. O resultado é uma onda em torno de cada partícula e que a tem como centro. (HUYGENS *apud* CARVALHO, 2005).

Na atualidade, o princípio de Huygens é apresentado da forma seguinte:

Todos os pontos de uma frente de onda se comportam como fontes pontuais de ondas secundárias. Depois de um intervalo de tempo  $t$  a nova posição da frente de onda é dada por uma superfície tangente à essas ondas secundárias. (HALLIDAY e RESNICK, 2009, p.77).

Cada ponto de uma frente de onda comporta-se como fonte puntiforme, gerando ondas secundárias. Num meio homogêneo, essas ondas são ondas esféricas com centro na fonte, propagando-se com a velocidade da onda no meio.

Dada uma frente de onda inicial, Huygens propõe uma construção geométrica para obter a frente de onda num instante posterior: consideram-se todas as ondas secundárias emanadas de pontos da frente de onda inicial não obstruídos por obstáculos. A frente de onda no instante posterior considerado é a envoltória dessas ondas secundárias (NUSSENZVEIG, 1998, p. 4).

A Figura 2 representa esquematicamente o princípio de Huygens.

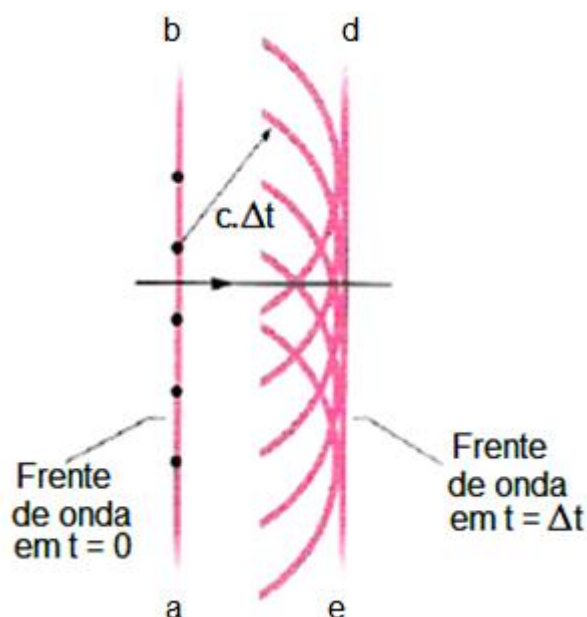


Figura 2 - Propagação de uma onda plana no vácuo de acordo com o princípio de Huygens. Fonte: HALLIDAY, RESNICK, 2009, p. 77.

Corroborando a eminência da teoria ondulatória para a luz, o tratado “Óptica”, de Isaac Newton (1642-1727), elaborado em 1704 e, revisto em 1717, 1721 e 1731, apresenta uma combinação entre as teorias corpuscular e ondulatória para a luz, fundamentada em observações experimentais meticolosas e sistemáticas dos fenômenos de reflexão e refração da luz, da decomposição da luz branca por prismas, do telescópio refletor, do arco-íris e da difração, entre outros (ASSIS, 1998). Quanto à heterogeneidade da luz branca, foram necessários vários experimentos e uma análise sofisticada para compor a sua argumentação. Quando criticado por Hooke a respeito da teoria das cores, Newton responde alegando que qualquer teoria para a luz – corpuscular ou ondulatória – deveria se adaptar à heterogeneidade da luz, pois esta já era para ele um fato comprovado (FORATO, 2009).

Dessa forma, ao longo do século XVIII, a Física contava com duas teorias excludentes para a luz. De um lado a teoria corpuscular, segundo a qual a luz era composta por minúsculas partículas emitidas pelos corpos luminosos e que se deslocavam através de espaços vazios e de corpos transparentes e de outro a teoria ondulatória que concebia a luz como uma onda que se propagava no éter, substância muito sutil que preenchia os espaços entre os corpos. Escolher entre essas teorias implicava também na escolha entre fragilizar ou não um corpo de conhecimento bem articulado e escolher entre concepções distintas do funcionamento do

Universo. O triunfo da teoria ondulatória teve início com os trabalhos de Thomas Young (1773 – 1829). Em 1801, ele realizou um experimento encontrando um efeito caracteristicamente ondulatório: a interferência. Young explicou que, ao atravessar o anteparo com duas fendas, a luz era espalhada formando frentes de onda circulares que interferiam entre si causando regiões claras e escuras observadas num segundo anteparo.

O termo interferência indica a superposição de duas ou mais ondas na mesma região do espaço. O princípio da superposição determina a onda resultante, quando ocorre a interferência. Esse princípio afirma que o deslocamento resultante em qualquer ponto em um dado instante é determinado pela soma dos deslocamentos instantâneos de cada onda individualmente. O termo deslocamento refere-se a um deslocamento real quando se trata de ondas na superfície de um líquido, para ondas sonoras indica o aumento ou redução da pressão do ar e para ondas eletromagnéticas compreende um componente específico do campo elétrico ou magnético (YOUNG e FREEDMAN, 2008).

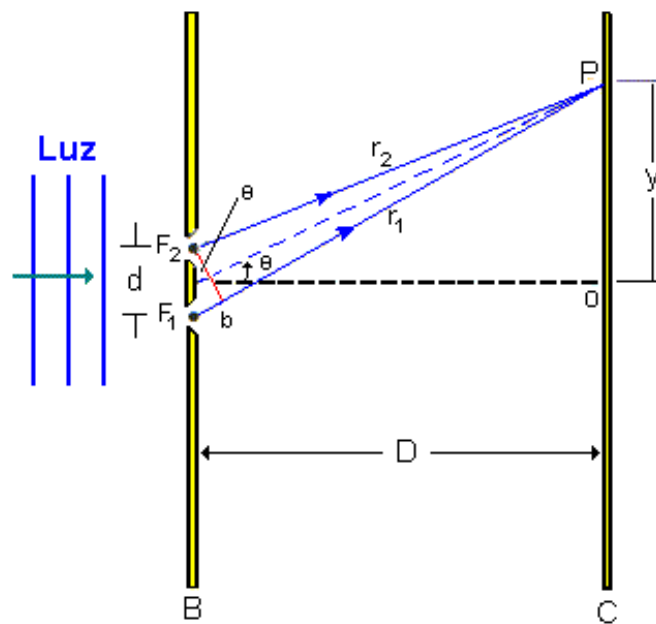


Figura 3 - esquema indicando as grandezas relevantes para a análise da interferência na fenda dupla. (Fonte: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAABKz4AJ/interferencia-por-fenda-dupla-young>)

Na Figura 3 temos,

$d \rightarrow$  a distância entre as fendas;

$D \rightarrow$  a distância das fendas ao anteparo;

$P \rightarrow$  um ponto arbitrário do anteparo no qual a interferência entre os feixes é estudada;

$y \rightarrow$  a posição relativa da franja ou vale;

$\theta \rightarrow$  a posição angular do ponto P;

$O \rightarrow$  o eixo óptico central do anteparo ( $y = 0$ ).

Para determinar se no ponto P haverá interferência construtiva (região clara) ou destrutiva (região escura), é necessário avaliar a diferença entre os caminhos percorridos pelos raios  $r_1$  e  $r_2$ ,  $\Delta L$ , até chegar ao ponto P.

A expressão matemática para a diferença de caminhos dos raios  $r_1$  e  $r_2$  em função do ângulo  $\theta$  se torna mais simples se considerarmos que a distância  $D$  entre as fendas e o anteparo é muito maior que a distância  $d$  entre as fendas. Sendo assim, podemos considerar os feixes  $r_1$  e  $r_2$  praticamente paralelos, formando o mesmo ângulo  $\theta$  com o eixo central. Podemos supor, também, que o triângulo ABC na Figura 4 é retângulo e o ângulo interno em A é  $\theta$ . Nesse caso,  $\sin \theta = \frac{\Delta L}{d}$  e, portanto,  $\Delta L = d \cdot \sin \theta$  (HALLIDAY e RESNICK, 2008).

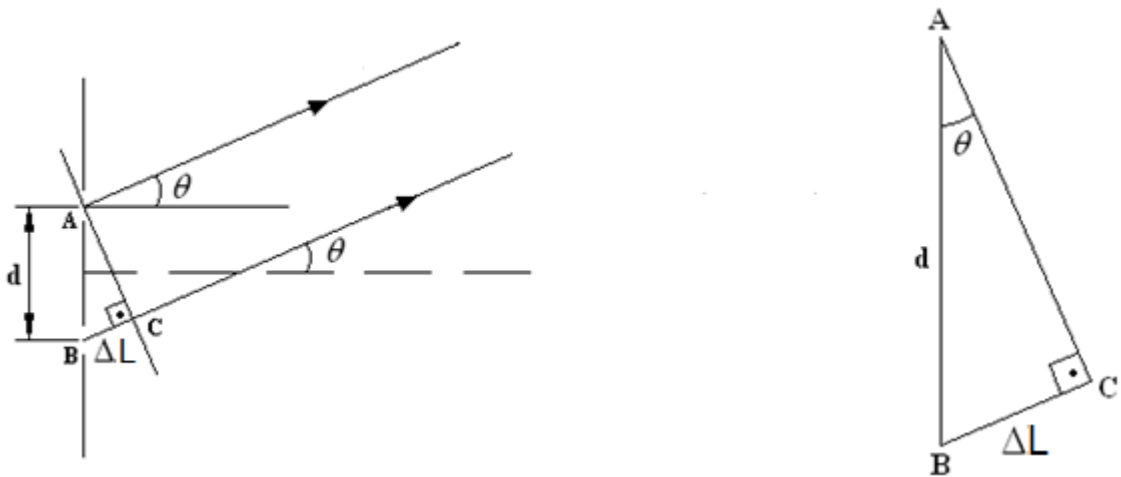


Figura 4 - esquema detalhado para análise geométrica da interferência na fenda dupla. (Fonte: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAABKz4AJ/interferencia-por-fenda-dupla-young>)

Considerando que as ondas tenham a mesma amplitude ao deixar as fendas, ou seja, deixam as fendas em fase, a *diferença de fase*  $\phi$  quando estas se encontrarem no ponto P da Figura 3 será devida à diferença de caminho percorrido,  $\Delta L$ . As componentes dos campos elétricos das ondas oriundas das fendas  $F_1$  e  $F_2$  são dadas, respectivamente, por:

$$E_1 = E_0 \cos(kx - \omega t - \phi), \quad (1)$$

$$E_2 = E_0 \cos(kx - \omega t), \quad (2)$$

Nas Equações (1) e (2),  $k$  é o número de onda que satisfaz a igualdade  $k = \frac{2\pi}{\lambda}$  e  $w$  é a frequência angular,  $w = 2\pi f$ , sendo  $f$  a frequência da onda. As componentes dos campos elétricos das ondas têm intensidade  $I_0$  tal que  $I_0 \propto |E|^2$ .

Para determinar a intensidade da onda resultante pela superposição de  $E_1$  e  $E_2$  devemos somar as equações (1) e (2),

$$E = E_1 + E_2 = E_0[\cos(kx - wt - \varphi) + \cos(kx - wt)] \quad (3)$$

Utilizando a relação trigonométrica

$$\cos A + \cos B = 2 \cos\left(\frac{A+B}{2}\right) \cos\left(\frac{A-B}{2}\right), \quad (4)$$

temos

$$E = E_0 2 \cos\left(\frac{kx - wt - \varphi + kx - wt}{2}\right) \cos\left(\frac{kx - wt - \varphi - kx + wt}{2}\right), \quad (5)$$

resultando em

$$E = 2E_0 \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) \cos\left(kx - wt - \frac{\varphi}{2}\right). \quad (6)$$

A componente de campo elétrico da onda resultante no ponto P é dada pela Equação (6), cuja amplitude é  $A = 2 E_0 \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right)$  e sua intensidade é dada por

$$I = A^2 = 4 E_0^2 \cos^2\left(\frac{\varphi}{2}\right) = 4 I_0 \cos^2\left(\frac{\varphi}{2}\right). \quad (7)$$

A diferença de fase  $\varphi$  entre as ondas que chegam ao ponto P da tela está associada à diferença de caminho das ondas  $\Delta L$  indicada na Figura 4. Se  $\Delta L = \lambda/2$ , a diferença de fase será  $\varphi = \pi$ , se  $\Delta L = \lambda$ ,  $\varphi = 2\pi$ , o que sugere que

$$\left(\begin{matrix} \text{diferença} \\ \text{de fase} \end{matrix}\right) = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\begin{matrix} \text{diferença} \\ \text{de caminhos} \end{matrix}\right) \quad (8)$$

Utilizando a Equação (8) e lembrando que  $\Delta L = d \cdot \sin \theta$ , chegamos à

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta, \quad (9)$$

que relaciona a diferença de fase  $\varphi$  entre as ondas que chegam ao ponto P com o ângulo  $\theta$  que localiza esse ponto P na tela de observação.

É possível ainda, determinar o campo elétrico da onda resultante da superposição de  $E_1$  e  $E_2$  de forma analítica. Utilizando números complexos para representar os campos elétricos, temos

$$E_1 = E_0 \cos(kx - wt - \varphi) = \text{Re}[E_0 e^{i(kx - wt - \varphi)}] \quad (10)$$

$$E_2 = E_0 \cos(kx - wt) = \text{Re}[E_0 e^{i(kx - wt)}]. \quad (11)$$

As partes reais dos números complexos representados pelas Equações (10) e (11) representam as quantidades físicas efetivamente e a soma das componentes será

$$E = E_1 + E_2 = E_0 \cdot e^{i(kx - wt - \varphi)} + E_0 \cdot e^{i(kx - wt)} \quad (12)$$

$$E = E_0(e^{i\varphi} + 1)e^{i(kx - wt)}. \quad (13)$$

A Equação (13) indica que a resultante do campo elétrico no ponto P é uma onda de amplitude  $A = E_0(e^{i\varphi} + 1)$ . A intensidade dessa onda pode ser determinada pelo módulo ao quadrado da sua amplitude. No caso do trabalho com números complexos, o módulo do quadrado é determinado multiplicando o número pelo seu conjugado,

$$I_0 \propto |E|^2 = I = A \cdot A^* = E_0(e^{i\varphi} + 1)E_0(e^{-i\varphi} + 1) \quad (14)$$

$$I = E_0^2(e^{i\varphi}e^{-i\varphi} + e^{i\varphi} + e^{-i\varphi} + 1) = E_0^2(1 + e^{i\varphi} + e^{-i\varphi} + 1). \quad (15)$$

Lembrando que  $e^{i\varphi} + e^{-i\varphi} = \cos \varphi + i \sin \varphi + \cos \varphi - i \sin \varphi = 2 \cos \varphi$ , temos

$$I = E_0^2 + E_0^2 + 2E_0^2 \cos \varphi \quad (16)$$

ou

$$I = 2I_0 + 2I_0 \cos \varphi \quad (17)$$

O último termo do segundo membro da Equação (17) é chamado termo de interferência e é o responsável pela diferença entre o que se obtém apenas somando as intensidades das ondas individuais – o primeiro termo da equação – e o que acontece realmente – as franjas de interferência.

Para que a interferência seja construtiva é preciso que  $\cos \varphi = 1$ , quando

$$\varphi = 2m\pi, (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots). \quad (18)$$

A interferência será destrutiva se  $\cos \varphi = -1$  e observada quando

$$\varphi = 2\left(m + \frac{1}{2}\right)\pi, (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots). \quad (19)$$

Tomando a Equação (9) e relacionando-a à Equação (18), verifica-se que o ponto P apresentará interferência construtiva, ou seja, franja clara, se a diferença de caminho  $\Delta L$  valer zero ou, um múltiplo inteiro do comprimento de onda  $\lambda$ , que pode ser expresso como

$$\Delta L = d \sin \theta = m \lambda, \text{ para } m = 0, 1, 2, \dots \text{ (máximos – franjas claras)} \quad (20)$$

Como  $D \gg d$ , podemos utilizar a aproximação  $\sin \theta \approx \theta \approx \tan \theta$  e, a partir da Figura 3, temos  $\sin \theta = \frac{y}{D}$  que combinado com a Equação (1) resulta em

$$y = \frac{m \lambda D}{d}, \text{ para } m = 0, 1, 2, \dots \quad (21)$$

A Equação (21) fornece as localizações dos máximos (franjas claras) no anteparo, acima do ponto O, em função da distância entre as fendas  $d$ , da distância entre as fendas e o anteparo  $D$ , e do comprimento da onda  $\lambda$ . Devido à simetria da Figura 3, para determinar os pontos de intensidade máxima abaixo do ponto O, basta tomar o valor oposto ao dado pela expressão. Então, os pontos de máxima intensidade luminosa serão dados por:

$$y = \pm \frac{m \lambda D}{d}, \text{ para } m = 0, 1, 2, \dots \quad (22)$$

Relacionando a Eq. (9) à (19), verifica-se que, para que a interferência seja destrutiva, ou seja, para que no ponto P haja uma franja escura, a diferença de caminho deve ser múltiplo ímpar da metade do comprimento de onda. Essa condição pode ser escrita como:

$$\Delta L = d \sin \theta = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda, \text{ para } m = 0, 1, 2, \dots \text{ (mínimos – franjas escuras)} \quad (23)$$

Procedendo de maneira análoga àquela feita para os pontos de máximo, determinamos que as localizações dos mínimos (franjas escuras) no anteparo em função da distância entre as fendas  $d$ , da distância entre as fendas e o anteparo  $D$ , e do comprimento da onda  $\lambda$  são dados por:

$$y = \pm \left(m + \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda D}{d}, \text{ para } m = 0, 1, 2, \dots \quad (24)$$

No entanto, o experimento da dupla fenda de Young não convenceu a maior parte da comunidade científica da época, que ainda dava preferência à teoria corpuscular. Em 1817, a Academia Francesa de Ciências propôs um prêmio para a melhor explicação para o fenômeno da difração. O vencedor do prêmio foi Augustin Fresnel (1788 – 1827), com um trabalho que defendia a teoria ondulatória da luz. O surpreendente neste evento foi o fato de todos os integrantes da comissão julgadora serem defensores da teoria corpuscular (FORATO, 2009).

Durante uma demonstração de Fresnel, o matemático Denis Poisson (1781-1840), apontou que, caso a teoria de Fresnel estivesse correta, um ponto brilhante deveria aparecer no centro da sombra projetada de um disco circular. E para surpresa de muitos, em especial de Poisson, partidário da teoria corpuscular, verificou-se o fato (CARVALHO, 2005).

A Figura 5 representa o tratamento dado atualmente à difração.

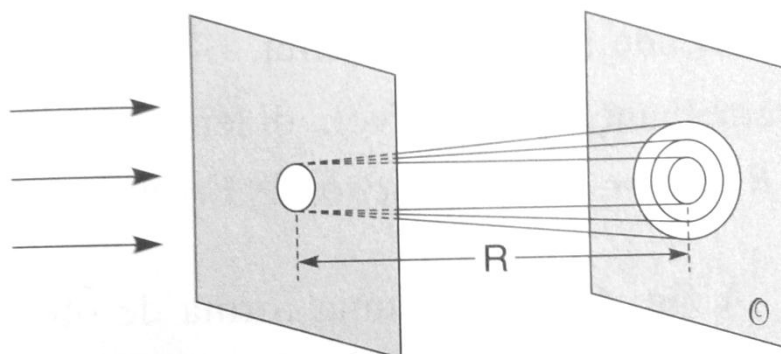


Figura 5 - Difração num orifício circular (Fonte: NUSSENZVEIG, 1998)

A Figura 5 apresenta um anteparo opaco com um pequeno orifício circular, iluminado por luz monocromática. De acordo com a lei de propagação retilínea da óptica geométrica, o feixe de luz que atravessa o orifício formaria uma imagem brilhante, no centro do anteparo de observação  $O$ , idêntica ao orifício e, fora dessa região, estaria completamente escuro (região de sombra).

Francesco Maria Grimaldi já havia observado que, quando o orifício é muito pequeno, como o furo feito por um alfinete, e a distância  $R$  é suficientemente grande, verifica-se que a luz penetra na região da sombra geométrica formando franjas claras e escuras. Esse desvio da propagação retilínea da luz foi chamado de difração com o sentido de deflexão da luz e pode

ser aplicado à passagem da luz por uma abertura e ao espalhamento da luz por um obstáculo (NUSSENZVEIG, 1998).

A difração é classificada, dependendo da distância  $R$  entre o objeto que a provoca e o anteparo de observação, em duas categorias. Para distâncias não muito grandes, quando a imagem formada preserva semelhança com a forma geométrica do objeto, mas se apresenta rodeada ou entremeada de franjas claras e escuras, dizemos que trata-se de *difração de Fresnel*. No caso da distância  $R$  ser suficientemente grande (formalmente  $R \rightarrow \infty$ ), o resultado – figura de difração formada – não guarda semelhança com a forma geométrica do objeto embora dependa do formato do mesmo. Nesse caso trata-se de *difração de Fraunhofer* (NUSSENZVEIG, 1998).

A difração pode ser analisada aplicando-se o princípio de Huygens, segundo o qual, cada ponto da frente de onda pode ser tomado como fonte de uma onda secundária que se espalha em todas as direções mantendo a velocidade de propagação da onda nesse meio. Para determinar o deslocamento em um dado ponto, é preciso combinar todos os deslocamentos individuais produzidos pelas ondas secundárias, conforme o princípio de superposição (YOUNG e FREEDMAN, 2008).

Devido à complexidade matemática de se descrever a difração de Fresnel, analisamos os mínimos de luminosidade para a difração de Fraunhofer admitindo que a distância entre a fenda e o anteparo de observação é muito maior que a largura da fenda.

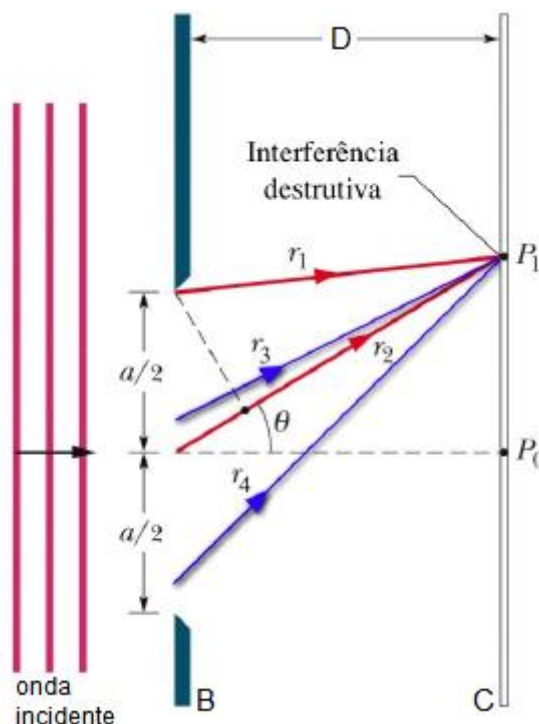


Figura 6 - Formação do primeiro mínimo de difração (HALLIDAY e RESNICK, 2009, p.113).

A Figura 6 é usada para estudar a difração de ondas luminosas de comprimento de onda  $\lambda$  que incidem em um anteparo B onde há uma fenda estreita e de comprimento  $a$ . A luz difratada atinge a tela de observação C, de forma que ondas provenientes de diferentes pontos da fenda interferem entre si, produzindo na tela uma série de franjas claras e escuras. As franjas claras correspondem a interferências construtivas (pontos de máximos de luminosidade) e as franjas escuras indicam interferências destrutivas (pontos de mínimos de luminosidade).

O máximo central (localizado em  $P_0$ ) pode ser justificado considerando que as ondas secundárias de Huygens provenientes de posições opostas da fenda, percorrem a mesma distância para chegar ao ponto  $P_0$  e como estas ondas foram emitidas em fase, chegam em fase ao referido ponto, provocando interferência construtiva. As demais franjas claras estão localizadas em posições intermediárias a dois mínimos consecutivos.

Para determinar o primeiro ponto de mínimo, dividimos a fenda em duas regiões de mesma largura  $a/2$ . Traçamos um eixo central que é perpendicular à tela C e dois raios  $r_1$  e  $r_2$  cada um da extremidade superior de uma região da fenda. A posição de  $P_1$  pode ser definida como o ângulo  $\theta$  entre o eixo central e a reta que liga o centro da fenda e o ponto.

As ondas secundárias associadas aos raios  $r_1$  e  $r_2$  saem da fenda em fase e para que formem o primeiro mínimo devem estar defasadas em  $\lambda/2$ . Essa defasagem é devida à

diferença de caminho percorrida pelos raios até  $P_1$ . Para determinar essa diferença escolhemos um ponto  $b$ , indicado na Figura 7, sobre  $r_2$  de forma que a distância de  $b$  ao centro da fenda seja a própria diferença de percurso. Lembrando que tratamos da difração de Fraunhofer para a qual  $D \gg a$ , os raios  $r_1$  e  $r_2$  podem ser considerados paralelos e formam o mesmo ângulo  $\theta$  com o eixo central.

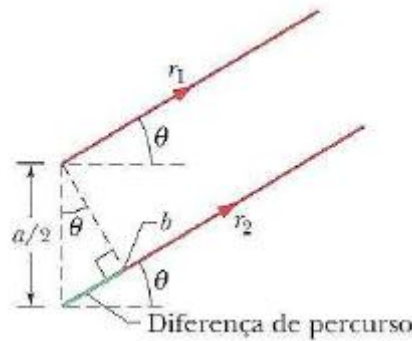


Figura 7 - Como  $D \gg a$ , os raios  $r_1$  e  $r_2$  são paralelos. (HALLIDAY e RESNICK, 2009, p.114).

Observando o triângulo retângulo da Figura 7, podemos concluir que a diferença de caminho  $\Delta L$  é dada por  $\Delta L = \frac{a}{2} \sin \theta$ . Igualando essa diferença à  $\lambda/2$  (condição de interferência destrutiva), obtendo  $\frac{\lambda}{2} = \frac{a}{2} \sin \theta$ , o que nos dá

$$a \sin \theta = \lambda \text{ (primeiro mínimo).} \quad (25)$$

A análise poderia ser feita para qualquer par de raios que tenham origem em posições correspondentes das regiões da fenda ( $r_3$  e  $r_4$  na Figura 7, por exemplo). Levaria ao mesmo resultado, por gerarem a mesma diferença de caminho  $\Delta L$  determinada anteriormente.

A observação da Equação (25) permite concluir que o espalhamento da luz é maior quanto menor for o valor de  $a$ . Por isso, a difração da luz não é observada cotidianamente como a do som, uma vez que requer fendas (ou obstáculos) de largura comparável ao seu comprimento de onda.

Para determinar o segundo mínimo de luminosidade na tela de observação  $C$ , imaginaremos a divisão da fenda em quatro partes de largura  $a/4$ , como na Figura 8, e procedemos de maneira análoga.

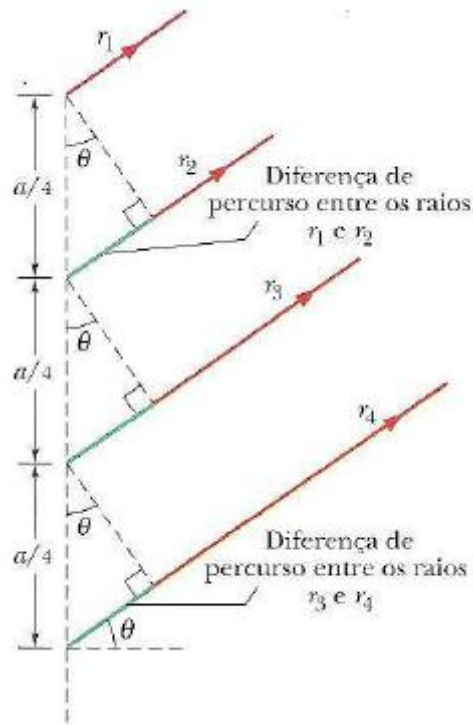


Figura 8 - raios provenientes do ponto superior de quatro regiões de largura  $a/4$  interferindo destrutivamente. Como  $D \gg a$ , os raios  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$  e  $r_4$  são paralelos (HALLIDAY e RESNICK, 2009, p.114).

Dos triângulos retângulos da Figura 8, podemos tirar que as diferenças de caminho são iguais a  $\frac{a}{4} \sin \theta$ , e fazendo essa diferença igual a  $\lambda/2$ , em virtude da interferência destrutiva, temos

$$a \sin \theta = 2\lambda \text{ (segundo mínimo)} \quad (26)$$

Observando as Equações (25) e (26) e imaginando que para os próximos mínimos a fenda seria dividida em mais partes, é possível identificar que os mínimos são localizados pela seguinte equação geral

$$a \sin \theta = m\lambda, \text{ para } m = 1, 2, 3, \dots \quad (27)$$

Observações de François Arago (1786-1853), juntamente a Fresnel, os levaram a concluir que, ao contrário do que se imaginava, a vibração da luz era perpendicular à sua linha de propagação e não paralelas à mesma. Essa conclusão era de difícil aceitação, devido à suposição da existência de um meio onde a luz se propagava: o éter (CARVALHO, 2005). Apenas no final do século XIX, os experimentos de Albert Abraham Michelson (1852 – 1931) e Edward Williams Morley (1838 – 1923), não conseguindo observar o “vento de éter”, mostraram que a hipótese da existência do éter era falsa.

Voltando à natureza da luz, foi apenas em 1862 que Léon Foucault (1819 – 1868) mostrou que a velocidade da luz na água era menor do que no ar, contrariando as previsões da teoria corpuscular. Em 1845, Michael Faraday (1791-1862) demonstrou que um campo magnético podia inverter os planos de polarização da luz (Efeito Faraday), concluindo que luz e magnetismo são resultados de uma mesma substância. A polarização é o fenômeno que *ocorre quando a luz interage com alguns materiais e resulta na seleção de algumas direções de vibração* (GREF, 2002) e é possível apenas para ondas transversais.

Em 1865, James Clerk Maxwell (1831-1879) inferiu que a luz era uma onda eletromagnética e previu que os fenômenos percebidos para a luz deveriam ocorrer com as demais ondas de mesma natureza. A comprovação experimental para o trabalho de Maxwell ocorreu em 1888, com os experimentos de Henrich Hertz (1857-1894) (CARVALHO, 2005).

As ondas luminosas vinham sendo utilizadas para registrar imagens bidimensionais de objetos, na fotografia, desde meados do século XIX. A fotografia se baseia no registro da intensidade das ondas sem utilizar nenhuma informação sobre a fase das mesmas. Em 1949, Dennis Gabor (1900-1979), físico húngaro naturalizado britânico, idealizou um processo que registraria não apenas a intensidade das ondas (como na fotografia), mas também suas fases, através de interferência. O processo proposto por Gabor seria formado em duas etapas: uma de registro das frentes de onda provenientes do objeto e a segunda de reprodução da imagem através do registro na primeira, de forma a produzir a mesma sensação visual que o próprio objeto (NUSSENZVEIG, 1998). O processo foi chamado de *holografia* (do grego “registro completo”) e, apesar de só ganhar impacto na década de 60 com o uso do LASER, rendeu a Gabor o prêmio Nobel em 1971.

Após séculos de discussões com embate de ideias sobre a natureza e a propagação da luz, como exposto nesta seção, fica claro que só é possível compreender os fenômenos de interferência e difração a partir da teoria ondulatória. No intuito de verificar como esta teoria e os fenômenos em questão são apresentados aos professores do ensino médio das escolas públicas, através dos livros didáticos disponíveis para escolha, a seção a seguir apresenta uma análise dos livros indicados pelo Programa Nacional do Livro Didático (BRASIL, 2011, 2014) à luz da teoria de Chevallard.

## 2.2. Interferência e Difração nos livros didáticos do PNLD

É uma constatação evidente que a Física ensinada na escola não é a mesma desenvolvida pelos cientistas. O conhecimento sofre reelaborações, desde sua produção até seu aparecimento nos programas de ensino e livros didáticos e deste ponto até ser trabalhado em sala de aula. Chevallard (1982, *apud* ALVES FILHO, PINHEIRO e PIETROCOLA, 2001) denominou essas transformações do saber de *transposição didática* e essa não se resume a uma escolha e simplificações de conteúdos a ensinar.

O conhecimento científico, fruto do trabalho produtivo de cientistas e intelectuais, é denominado, na teoria da transposição didática, por *saber sábio* e em cada área do conhecimento sua gênese tem caminhos específicos, como por exemplo, a observação e a experimentação no caso da Física. Para que o saber sábio se transforme em *saber a ensinar*, o conhecimento que é apresentado nos programas de ensino e livros, leva-se em conta um grande número de variáveis e pessoas. Pesam nessa primeira transposição os interesses dos autores (tanto de livros textos como de manuais didáticos), dos especialistas da disciplina, dos professores e a opinião pública (ALVES FILHO, PINHEIRO e PIETROCOLA, 2001). Esses interesses e opiniões contam com a influência dos critérios estabelecidos para que os livros didáticos sejam aprovados pelo Programa Nacional do Livro Didático PNLD, que em sua última versão (BRASIL, 2014) incluiu a possibilidade de obras multimídia, além daquela exercida pelos meios de comunicação.

A transformação do saber sábio em saber a ensinar é uma espécie de reelaboração do conhecimento que se dá por três processos: despersonalização, dessincretização e descontextualização. O primeiro faz parecer que o conhecimento se originou de uma pesquisa impessoal, perdendo a dimensão do problema em que o pesquisador estava inserido e desaparecendo tudo do contexto humano histórico e social.

A dessincretização desfaz a relação do conhecimento com o problema em que estava imerso, tornando-se um tópico específico e sendo necessária uma recontextualização para que se torne um objeto de ensino. Com a descontextualização, a história a que a pesquisa estava ligada é suprimida para que o conhecimento possa se prestar a uma generalização.

Através desses processos, o saber sábio é tirado dos seus contextos epistemológico e histórico e da linguagem própria das publicações da área, a fim de ressurgir em um novo contexto conceitual, organização a-histórica e dita lógica, assim como plausibilidade e

validade compartilhadas pela comunidade específica, figurando como saber a ensinar (ALVES FILHO, PINHEIRO e PIETROCOLA, 2001). Esta organização lógica depende dos autores das obras, mas é bastante comum que siga uma sequência de pré-requisitos, na qual se entende que não seria possível aprender um conteúdo sem ter conhecimento prévio de outro.

Concordamos com Cordeiro e Peduzzi (2013), segundo os quais essas descontextualizações propagam imagens deformadas da figura do cientista e do trabalho científico. Entre as deformações, acreditamos que aquelas que mais atingem os alunos da educação básica, sejam a imagem do cientista como “gênio que faz tudo” sem ajuda de outros, a imagem da ciência neutra sem influências tecnológicas ou sociais e a imagem ateorica da ciência, segundo a qual a teoria sempre vem depois da experiência.

No espaço da preparação da aula e do lecionar, o conhecimento passa por nova transposição, transformando-se em *saber ensinado*. Nesta nova formulação do saber, pesam as concepções pessoais do professor, os interesses e opiniões da comunidade escolar. A seleção de um conteúdo para compor essa esfera do saber, garante que foi atestada sua relevância na organização social e na relação com os valores culturais e que seu valor é tido como consensual em *status* de verdade, como evidência incontestável das coisas naturais. Além disso, o conteúdo que é transposto deve estar de acordo com a atualidade moral, por ser considerado importante e necessário para a sociedade, e, também, com a atualidade biológica, por possuir atualidade em relação à própria ciência de referência. Para o contexto escolar, de um conteúdo que compõe o saber a ensinar são exigidas ainda, a operacionalidade e a criatividade didática. É considerado operacional todo conteúdo capaz de produzir atividades e tarefas, assim como ser apresentado em exercícios, que possibilitem uma avaliação mais objetiva do processo. A criatividade implica na criação de um saber com identidade própria do contexto escolar, ao relacionar características conceituais importantes do saber sábio com aspectos fundamentais da sala de aula. Finalmente, o conteúdo permanece como saber a ensinar se sobreviver à terapêutica, isto é, se sua aplicação em sala de aula delimitar suas possibilidades didático-pedagógicas e articulação com os demais conhecimentos já estabilizados no currículo (PIETROCOLA, 2008).

Considerando que o livro didático é a principal referência de professores e estudantes na Educação Básica, estamos interessados em analisar, nesta seção, como os fenômenos de interferência e difração são abordados nos livros aprovados pelo Ministério da Educação (BRASIL, 2011) para utilização nas escolas de ensino médio de todo o país. Os livros analisados foram indicados pelo Guia de livros didáticos (BRASIL, 2011) do Programa

Nacional do Livro Didático – PNLD 2012. Como a lista de livros aprovados pelo Ministério da Educação foi modificada no decorrer da realização do mestrado (BRASIL, 2014), avaliamos também as alterações que a apresentação dos temas de interesse sofreram nas coleções que já estavam aprovadas anteriormente e buscamos pelos conteúdos nas coleções incluídas recentemente. A lista de livros de 2012 do PNLD contava com dez coleções, cada uma composta por três volumes; a versão de 2015 conta com as mesmas dez e inclui outras quatro coleções, também divididas em três volumes.

O levantamento foi realizado meticulosamente em cada volume das coleções e, como todas tratavam dos temas de alguma forma, passamos a apresentação dos mesmos nos livros, identificando como foram realizadas a descontextualização, dessincretização e despersonalização do tema em estudo, assumindo os elementos preconizados por Cordeiro e Peduzzi (2013). Enfocamos, ainda, a operacionalidade, ou seja, se o livro contém exercícios, atividades e tarefas que permitem uma avaliação objetiva, bem como questões e situações-problema. Esses elementos de análise foram identificados como relevantes para estabelecer critérios de comparação entre as obras, considerando-se, diferentemente do referencial teórico adotado, que uma descontextualização pragmática empobrece o conhecimento, não permitindo analisar as questões filosóficas, epistemológicas e políticas do contexto da descoberta. A operacionalidade é considerada um elemento de análise essencial, já que a mesma concorre para a consolidação do conteúdo como conteúdo de ensino, ou seja, sua permanência no currículo real.

A análise dos livros mostrou que todas as dez coleções indicadas no PNLD 2012 tratavam dos temas interferência e difração, com a utilização de figuras e/ou esquemas ilustrados. Os assuntos permaneceram nas coleções que tiveram sua indicação mantida para o PNLD 2015 e também apareceram nas quatro novas coleções incluídas na última versão do programa. Algumas diferenças foram percebidas entre as versões e são apresentadas na sequência.

Para facilitar a organização dos dados levantados nos livros, utilizamos a associação de cada coleção a um número, conforme descrito no Quadro 1.

**Quadro 1** - Coleções para apresentação dos dados levantados nos livros didáticos.

Código	Nome do Livro	Autores
[1]	Compreendendo a Física	Alberto Gaspar
[2]	Conexões com a Física	Blaidi Sant’Anna

		Gloria Martini Walter Spinelli Hugo Carneiro Reis
[3]	Física	Alysson Ramos Artuso Marlon Wrublewski
[4]	Física	José Roberto Castilho Piqueira Wilson Carron José Osvaldo de Souza Guimarães
[5]	Física	José Roberto Bonjorno Clinton Marcico Ramos Eduardo de Pinho Prado Renato Casemiro Regina de Fátima S. A. Bonjorno Valter Bonjorno
[6]	Física	Newton Villas Bôas Ricardo Helou Doca Gualter José Biscuola
[7]	Física – Conceitos e Contextos: Pessoal, Social, Histórico	Maurício Pietrocola P. de Oliveira Alexander Pogibin Renata Cristina de Andrade Oliveira Talita Raquel Luz Romero
[8]	Física aula por aula	Claudio Xavier da Silva Benigno Barreto Filho
[9]	Física Ciência e Tecnologia	Carlos Magno A. Torres Nicolau Gilberto Ferraro Paulo Antonio de Toledo Soares Paulo Cesar Martins Penteado
[10]	Física Contexto & Aplicações	Antônio Máximo Ribeiro da Luz Beatriz Alvarenga Álvares
[11]	Física Interação e Tecnologia	Aurélío Gonçalves Filho Carlos Toscano
[12]	Física para o Ensino Médio	Luiz Felipe Fuke Kazuhito Yamamoto
[13]	Quanta Física	Luís Carlos de Menezes Osvaldo Canato Jr. Carlos Aparecido Kantor Lilio Alonso Paoliello Jr. Marcelo de Carvalho Bonetti Viviane Moraes Alves
[14]	Ser Protagonista Física	Angelo Stefanovits

Fonte: Próprio da autora

A Tabela 1, a seguir, mostra a quantidade de páginas dedicadas aos conteúdos de interferência e difração, bem como o número de ilustrações e esquemas, equações, gráficos e exercícios, que cada coleção disponibiliza ao longo da apresentação dos conteúdos.

**Tabela 1** - Quantidade de páginas, ilustrações e esquemas, equações, gráficos e exercícios dedicados aos conteúdos de interferência e difração em cada coleção indicada pelo PNLD 2015 (BRASIL, 2014).

<b>Livros</b>	<b>Páginas</b>	<b>Ilustrações e esquemas</b>	<b>Equações</b>	<b>Gráficos</b>	<b>Exercícios Propostos</b>
[1]	15	31	3	6	10
[2]	6	14	-	-	2
[3]	6	14	2	-	1
[4]	3	9	2	-	3
[5]	4	9	1	-	6
[6]	13	31	3	-	7
[7]	3	12	-	-	3
[8]	7	13	2	-	19
[9]	3	10	-	-	2
[10]	6	16	-	-	16
[11]	3	5	-	-	9
[12]	4	10	1	-	3
[13]	2	8	1	-	9
[14]	2	7	-	-	7

Fonte: Própria da autora.

A maioria das obras traz o tratamento da interferência e da difração no seu segundo volume, de forma que os dados da Tabela 1 indicam quantidades presentes neste volume das coleções. As exceções são as obras [7], [8] e [13]. No primeiro caso, a interferência é analisada no terceiro volume e a difração é citada em dois volumes, juntamente com a interferência neste volume e no capítulo sobre som no segundo volume. Já nas obras [8] e [13], os fenômenos não aparecem no segundo volume, sendo integralmente apresentados no terceiro. Assim, os dados da Tabela 1 para estas obras, correspondem ao terceiro volume das referidas coleções.

Entre as coleções indicadas pelo Guia de Livros Didáticos (BRASIL, 2014) as obras [1], [2], [4], [5], [6], [9] e [12] apresentam a difração e a interferência nos segundo e terceiro volumes. A maior parte dos autores das obras que trazem os fenômenos em dois volumes, teve a análise focada no segundo volume, uma vez que no terceiro volume os fenômenos são apenas apresentados como justificativa da teoria ondulatória, corroborando o comportamento dual da luz. A exceção, neste caso, é a coleção [9], que traz interferência e difração juntamente com o conteúdo de ondulatória no segundo volume, mas no terceiro mostra a interferência com o tratamento matemático que não havia aparecido no volume anterior.

Todas as obras trazem uma abordagem conceitual dos fenômenos. Em 57% das obras analisadas, além do tratamento conceitual, é apresentado também um aporte matemático

através de equações e gráficos. A abordagem matemática é observada nas obras [1], [3], [4], [5], [6], [8], [12] e [13] e, entre elas, apenas a primeira apresenta gráficos de intensidade da luz ao atingir um anteparo após difração em fenda simples, interferência na fenda dupla e até para redes de difração. Apesar de muitos dos autores incluírem tratamento matemático nas obras, a abordagem parece indicar que esse aspecto é considerado apenas como ferramenta e não como estruturante dos raciocínios, uma vez que as equações são dadas prontas sem grandes discussões a respeito da dependência funcional entre as grandezas.

A quantidade de exercícios varia bastante entre os livros, indo desde apenas um exercício envolvendo difração e nenhum para a interferência, como no texto da obra [3], até a proposição de 16 e 19 exercícios envolvendo os fenômenos, como nos casos de [10] e [8], respectivamente. A possibilidade de diferentes elaborações de exercícios permite analisar o caráter operacional do tratamento dos temas e mostra a identidade própria da sala de aula do o saber em questão, garantindo a criatividade aos mesmos.

Metade as obras analisadas não apresenta nenhuma contextualização histórica sobre os fenômenos, enquanto os autores das coleções [2], [3], [6], [7], [8], [10] e [11] trazem alguma informação a respeito de nomes como Huygens e Young, e sobre o debate histórico acerca da natureza da luz entre o modelo corpuscular e o modelo ondulatório, destacando a importância da observação dos fenômenos de interferência como argumento na defesa do último.

Os autores dos livros indicados pelo código [12] preocupam-se, ainda, em relacionar os fenômenos a efeitos observados no cotidiano, trazendo em um quadro informações sobre a interferência na produção de cores em bolhas de sabão, manchas de óleo e nas penas do pavão. Na perspectiva de mostrar aplicações para os fenômenos, [1] traz fotos mostrando como a interferência em películas finas funciona nas lentes antirreflexivas de óculos para correção de problemas visuais e um quadro no qual a espectroscopia é apresentada como aplicação da difração.

Todas as coleções apontadas pelo Guia de Livros Didáticos (BRASIL, 2011, 2014) apresentam os conteúdos de interesse deste trabalho. Essa presença dos conteúdos nos permite concluir que os mesmos apresentam os atributos necessários (consenso, atualidade, operacionalidade, criatividade e terapêutica) para se estabelecer como conteúdo a ser ensinado no ensino médio.

Metade das coleções analisadas evidenciam os processos de despersonalização, descontextualização e dessincronização dos conteúdos, pois não trazem nenhuma informação

acerca do contexto histórico da discussão científica à época de sua gênese, dando um caráter impessoal e generalizante aos conteúdos abordados.

A atualidade moral<sup>2</sup> dos fenômenos é destacada quando os autores explicitam a articulação entre esse conhecimento e a explicação de fatos observados no cotidiano e sua atualidade biológica<sup>3</sup> é evidenciada nas obras que tratam tanto do debate histórico acerca da natureza da luz, uma vez que interferência e difração são fundamentais na defesa do modelo ondulatório, quanto na discussão do caráter dual, necessária à abordagem da física quântica.

Tendo em vista os condicionantes e responsabilidades inerentes à tarefa de análise e escolha trienal dos livros didáticos e a importância deste na prática pedagógica do professor, a disponibilização da análise ora realizada figura como uma importante ferramenta para a seleção dos livros didáticos. Diante do exposto nesta seção, podemos inferir que a interferência e a difração conseguiram se estabelecer como saberes a serem ensinados no ensino médio, ainda que a opção do livro ou do professor seja uma abordagem apenas conceitual.

Pensando agora na transposição do saber a ensinar a saber ensinado, na próxima seção, apresentamos a teoria dos campos conceituais que utilizamos como referência na elaboração de uma sequência didática. Esta sequência visa auxiliar os professores na tarefa de garantir que estes fenômenos se consolidem como saber ensinado, incluindo, ainda, uma abordagem matemática adequada dos mesmos.

### 2.3. Teoria dos Campos Conceituais

Apesar do cenário variado de modelos para a natureza da luz e cada um com uma lógica para explicar sua propagação, usualmente, a abordagem no ensino médio se restringe ao estudo de aspectos geométricos baseados no conceito de raio de luz e na análise das características de alguns elementos específicos. Apesar de aparecer nos livros didáticos, conforme verificação descrita na seção anterior, se consagrando como conteúdo do saber a

---

<sup>2</sup> A atualidade moral diz respeito a um tipo de conhecimento que possa ser avaliado como importante pela sociedade e necessário à composição curricular. (PIETROCOLA, 2008)

<sup>3</sup> O saber deve possuir uma atualidade em relação à ciência praticada. (PIETROCOLA, 2008)

ensinar, a óptica física ainda não se estabeleceu como saber ensinado, uma vez que em muitas escolas públicas da região a prioridade é o estudo da óptica geométrica. Considerando que na óptica geométrica os esforços são dedicados ao cálculo de ângulos e distâncias em situações que incluem espelhos, prismas e lentes, o ensino de óptica fica limitado a um curso aplicado de geometria euclidiana (GIRCOREANO, 1997). Essa abordagem não evidencia que a luz se propaga num espaço tridimensional, que há uma fonte de luz e que existem obstáculos para a propagação (GICOREANO e PACCA, 2001).

Os fenômenos ondulatórios têm papel de destaque na maioria das tecnologias modernas, como, por exemplo, aqueles que se relacionam com a transmissão de informação ou energia. Esse caráter ondulatório tem como principal assinatura a propriedade de superposição de ondas, tornando o tratamento ondulatório da luz uma demanda da sociedade moderna e, portanto, da escolarização básica da atualidade. Tamanha é a importância da conscientização sobre as muitas facetas da luz e as tecnologias advindas do seu conhecimento, que o ano de 2015 foi proclamado na Assembleia Geral das Nações Unidas, como o Ano Internacional da Luz, e das Tecnologias baseadas em Luz.

Para um trabalho de intervenção pedagógica, é importante que seja definido o referencial teórico utilizado. Em busca de uma teoria que pudesse nos auxiliar no planejamento das atividades de intervenção e posterior análise dos resultados, escolhemos a teoria dos campos conceituais de Gerard Vergnaud. Sua teoria pós-construtivista alia aspectos cognitivistas, enfatizando os processos mentais de aprendizagem, fruto de sua herança piagetiana com os aspectos sociais da aprendizagem, que exercem influência sobre a forma do indivíduo de interpretar o mundo (TAUCEDA e DEL PINO, 2014).

Vergnaud foca o estudo do funcionamento cognitivo do "sujeito-em-situação", partindo da premissa que o conhecimento está organizado em campos conceituais e que o domínio dos mesmos, por parte do sujeito, demanda um longo período de tempo, através de experiência, maturidade e aprendizagem (MOREIRA, 2002). Campo conceitual é, segundo a proposição do autor,

“um conjunto informal e heterogêneo de problemas, situações, conceitos, relações, estruturas, conteúdos e operações de pensamento, conectados uns aos outros e, provavelmente, entrelaçados durante o processo de aquisição” (VERGNAUD apud MOREIRA, 2002).

A demanda do tempo é longa, pois novos problemas e novas propriedades devem ser estudados, sendo as dificuldades conceituais superadas à medida que são encontradas e enfrentadas gradativamente.

A teoria dos campos conceituais, ainda segundo Moreira (2002), se fundamenta em três conceitos-chave, além do próprio conceito de campo conceitual. Esses conceitos são o conjunto de situações que dão sentido ao conceito, o conjunto de invariantes ou esquema e as representações. Os invariantes podem ser identificados e utilizados pelos sujeitos para analisar e dominar as situações do primeiro conjunto e as representações simbólicas (linguagem natural, gráficos e diagramas, sentenças formais, etc.) usadas para indicar e representar os mesmos e, conseqüentemente, representar as situações e os procedimentos para lidar com as mesmas.

Isso implica que para estudar o desenvolvimento da formalização e uso de um conceito, ao longo da aprendizagem ou de sua utilização, é necessário considerar esses três conjuntos (situação, invariantes e representações) simultaneamente e, de forma articulada. O conjunto de situações é chamado de referente do conceito, os invariantes compõem o significado do conceito e as representações simbólicas formam o conjunto de significantes. Em certo campo conceitual existe uma grande variedade de situações e os conhecimentos dos alunos são moldados pelas situações que encontram e progressivamente dominam (VERGNAUD, 1990). Segundo o autor, muitas de nossas concepções vêm das primeiras situações que fomos capazes de dominar ou de nossa experiência tentando modificá-las.

As situações é que dão sentido ao conceito, mas o sentido não está nas situações em si próprias, assim como não está nas palavras nem nos símbolos. O sentido é uma relação que se estabelece entre o sujeito, as situações e os significantes. São os esquemas que o sujeito precisa mobilizar, devido a uma nova situação ou uma representação, que constituem o sentido dessa situação ou representação para o sujeito. Quando o sujeito usa um esquema ineficaz para certa situação, a experiência o leva a mudar de esquema ou a modificá-lo. Muitos deles podem ser evocados sucessivamente, e mesmo simultaneamente, em uma situação nova para o sujeito.

Segundo Moreira (2002, p.12), o que Vergnaud chama de esquema é “a organização invariante do comportamento para uma determinada classe de situações”. Devido à diversidade de situações possíveis, um esquema pode ser formado por metas e antecipações, regras de ação, invariantes operatórios e possibilidades de inferência.

Os invariantes operatórios, conhecimentos contidos nos esquemas, incluem os conceitos-em-ação e os teoremas-em-ação. Um conceito-em-ação é uma categoria de pensamento (objeto, predicado) tida como relevante para um teorema e por sua vez, um teorema-em-ação é uma proposição tida como verdadeira sobre um conceito. Não existem proposições – que podem ser verdadeiras ou falsas – sem conceitos e estes, que podem ser relevantes ou não, são ingredientes dos teoremas. (MOREIRA, 2002).

A construção do conhecimento pelo aprendiz é um processo complexo, demorado, com avanços e retrocessos, continuidades e rupturas. É necessário desestabilizar cognitivamente o aluno, mas também é preciso distinguir quais as rupturas necessárias e identificar sobre quais conhecimentos prévios o estudante pode se apoiar para aprender.

O conjunto das representações é constituído pelas formas de linguagem que permitem representar simbolicamente o conceito e suas propriedades, bem como as situações e os processos de tratamento. Para que se defina um conceito, é necessário uso de termos emprestados da linguagem natural ou de sistemas simbólicos (NOGUEIRA e REZENDE, 2014). Sendo a descrição matemática uma característica dos processos físicos, destacamos entre os sistemas simbólicos, neste trabalho, as representações matemáticas incluindo equações, tabelas e gráficos.

De acordo com Karam (2012) a matemática pode exercer várias funções na física: serve de ferramenta, como linguagem e como estruturante do raciocínio. No entanto, a percepção da matemática com o papel de mera ferramenta para a física é bastante comum entre os estudantes do ensino médio (e entre seus professores) como destacam Machado e Costa (2009). Para esses estudantes, a física é considerada difícil, pois se torna um jogo de encaixe na busca pela fórmula mais adequada.

Para Pietrocola (2002) a linguagem é a forma que nosso pensamento usa para lidar com as ideias e articulá-las na construção de significados, ou seja, é a forma de estruturar o pensamento. O autor considera que a matemática, enquanto linguagem da ciência, tem papel estruturante no processo de produção das interpretações do mundo, pois “empresta sua própria estruturação ao pensamento científico para compor os modelos físicos sobre o mundo” (2002, p. 101)

Acreditamos que a teoria da transposição didática, apresentada na segunda seção deste capítulo, sintetize o caminho percorrido na preparação e execução deste trabalho, pois partimos da análise da difração e da interferência como saber sábio, na seção 2.1, verificamos

como os temas são apresentados enquanto saber a ensinar nos livros didáticos aprovados pelo PNLD (BRASIL, 2011, 2014) e descrevemos, no próximo capítulo, a implementação de uma sequência didática sobre interferência e difração, à luz da teoria dos campos conceituais, que configura o saber efetivamente ensinado.

### 3. METODOLOGIA

A pesquisa a que se refere este trabalho trata-se de um estudo de caso e foi realizada com alunos do segundo ano do ensino médio do turno matutino de uma escola estadual localizada na cidade de Uberlândia-MG.

Como resultado da educação em massa, as turmas são numerosas e heterogêneas e, além disso, a quantidade de aulas para o conteúdo de Física é pequena, apenas duas aulas semanais. Com um grande número de alunos em sala de aula, é comum que seja preciso chamar a atenção dos alunos devido às conversas que não são pertinentes ao assunto trabalhado.

A análise da sequência proposta e sua implementação está subsidiada em três formas de registro: a filmagem das aulas, o diário de bordo da professora e as produções escritas dos alunos. Ao buscar as atividades para compor a sequência didática, consideramos a necessidade de que os estudantes vivenciassem situações diversas, a fim de dominar progressivamente várias representações e invariantes para os campos conceituais trabalhados. Por isso, incluímos na sequência uma diversidade de estratégias, como exposições dialogadas, simulações computacionais e a utilização do software *Modellus* na criação e análise de gráficos.

Além da necessidade de situações diversas, a inclusão do uso do software na sequência se justifica por acreditarmos que seja fundamental a incorporação de novas tecnologias ao ambiente escolar, para possibilitar a integração dos estudantes ao mundo contemporâneo nas dimensões da cidadania e do trabalho, conforme apontam os Parâmetros Curriculares Nacionais (BRASIL, 2000). Além disso, a inserção dos computadores no meio social os transforma em fonte de opções para novas descobertas (SCHAFF, 1990 *apud* CARDOSO e DICKMAN, 2012) possibilitando a aprendizagem através de metodologias contextualizadas à sociedade moderna.

A decisão para realizar, no decorrer da sequência, o tratamento matemático dos conceitos de interesse parte de constatação semelhante à de Machado e Costa (2009) que afirmam que os estudantes do ensino médio consideram a física e a matemática difíceis. Estes estudantes percebem comumente a física como um amontoado de fórmulas para decorar e, para muitos dos seus professores, a matemática é uma ferramenta para a física. A física é considerada difícil, pois se torna um jogo de encaixe na busca pela fórmula mais adequada para um determinado exercício, sem conexão aparente com o exercício seguinte.

Quando o fracasso escolar em física é atribuído à falha nos conhecimentos matemáticos que os alunos deveriam ter adquirido previamente pelos professores da disciplina, às aulas de física (PIETROCOLA, 2002), significa atribuir-lhe um papel de mero descritor do real. Paradoxalmente, os estudantes, em geral, são aprovados na disciplina matemática.

Considerando a matemática como a linguagem estruturante do pensamento científico, o ensino da ciência deve favorecer à percepção de

que não se trata apenas de saber Matemática para poder operar as teorias Físicas que representam a realidade, mas de saber apreender teoricamente o real através de uma estruturação matemática (PIETROCOLA, 2002, p.106).

Nossa perspectiva é que, através da proposição de atividades de modelagem matemática, realizadas no ambiente do pacote *Modellus*, o raciocínio matemático esboçado nas representações da Seção 2.1 possa estruturar o raciocínio dos estudantes viabilizando e consolidando a compreensão dos conceitos e das hipóteses para explicar os fenômenos físicos de interesse. Muitos são os conhecimentos matemáticos necessários, no entanto a trigonometria figura como mais recente no trajeto escolar dos alunos e, além de adequado a esse nível de ensino é abordado na disciplina matemática do mesmo ano.

Tendo em vista cada um dos aspectos expostos, o estudo piloto – primeira versão da sequência – foi aplicado no segundo semestre de 2014, junto a estudantes do segundo ano do ensino médio. As atividades foram realizadas concomitantemente em sete turmas com cerca de 40 alunos cada. Em duas turmas foi realizada a gravação em vídeo. Em todas as turmas foram consideradas as produções escritas dos estudantes e as notas diárias da professora.

O Quadro 2 mostra como foram distribuídas as atividades ao longo da aplicação do estudo piloto, que contou com 18 aulas de 50 minutos. Estão descritas, de forma sucinta, quais foram as atividades propostas para cada aula e quais as atividades esperadas dos estudantes durante sua realização.

**Quadro 2** - Organização do estudo piloto: atividades propostas e atividades esperadas dos discentes

Aula	Atividade	Atividade Discente
1	Questionário Prévio	Responder o questionário
2,3	Apresentação de slides, vídeos, imagens e textos, simulações (PhET) sobre os conceitos	Observar e participar formulando e respondendo perguntas

	iniciais e espectros eletromagnético e sonoro	
4,5	Resolução e discussão das situações-problema propostas	Responder às questões e discutir suas respostas com o grupo
6,7	Atividade em dupla e sua socialização	Responder e socializar com a turma, chegando à resposta mais adequada
8	Polarização: leitura de textos, observação dos óculos, imagens, animação e peneira de barbante	Leitura, observações e questionamentos
9,10	Uso do software <i>Modellus</i> para interpretação da função senoidal que representa a variação da intensidade do campo da onda – Eq. (1)	Manipulação do programa e resposta às questões
11	Interferência de ondas: slides, simulações	Observações e questionamentos
12,13	Uso do software <i>Modellus</i> para representação da interferência de duas ondas	Manipulação do programa e resposta às questões
14	Difração: slides, vídeo, simulação, demonstração com laser	Observar e participar formulando e respondendo perguntas
15	Uso do software <i>Modellus</i> para representação da difração	Manipulação do programa e resposta às questões
16,17	Retomada do conteúdo	Observações e questionamentos
18	Fechamento da sequência retomando o tema gerador holografia	Observar e participar formulando e respondendo perguntas

Fonte: próprio da autora

Algumas modificações foram feitas na sequência para a segunda aplicação. A maior diferença está na inclusão de duas aulas: uma com uso de materiais lúdicos para melhor percepção da onda por parte dos estudantes e outra com uma apresentação das funções trigonométricas e do ambiente de trabalho do software *Modellus*. Ocorreu também alteração na disposição das atividades ao longo da aplicação da sequência e a inclusão de uma linha do tempo com aspectos históricos da evolução dos conceitos ligados a luz. Tais diferenças serão mais bem detalhadas nas seguintes seções.

### 3.1. ESTUDO PILOTO

As atividades foram iniciadas a partir da aplicação de um questionário prévio (Figura 7 do apêndice). Antes da aplicação do referido questionário, foi esclarecido aos alunos que sua finalidade era verificar informações que os mesmos pudessem fornecer a respeito do assunto que seria tratado nas aulas seguintes e que não seriam considerados acertos e erros, mas que as respostas serviriam para direcionar as aulas.

As perguntas se referiam a situações cotidianas nas quais as ondas ficam em evidência. A primeira questão se referia à “ôla”, coreografia realizada por espectadores de eventos esportivos e musicais, perguntando a qual ente físico o efeito visual do movimento entre as arquibancadas se assemelha, e, pedindo que os alunos descrevessem características desse ente, caso eles soubessem. Segundo a proposição de Vergnaud, o invariante relacionado à situação posta é o conceito de onda e a representação refere-se aos picos e vales.

Na segunda questão, a situação referida trata do caso do avião Boeing 777 da *Malaysia Airlines*, desaparecido em março de 2014, perguntando como o mesmo poderia ser procurado no fundo do oceano e qual a diferença nessa busca em relação à procura de um avião no ar. Os invariantes evocados são referentes à propagação de ondas em diferentes meios e reflexão e sobreposição das mesmas.

A questão seguinte abordava música, sobre quais seriam as diferenças entre um som musical e um ruído. Nesse caso, além da situação considerar ondas sonoras, permite a posterior exploração da representação matemática da forma da onda em relação à composição de harmônicos. A quarta questão trazia a formação da imagem nas projeções de cinema 3D. A última fazia menção a situações de filmes, nas quais alguns personagens aparecem de forma holográfica e perguntava se isso seria possível e, caso fosse, como aconteceria.

As duas aulas seguintes foram destinadas à introdução do conteúdo de ondas que emergiu da discussão levantada com as perguntas do questionário. Para cada pergunta foi apresentada uma imagem ou um vídeo relacionada à situação.

Foram apresentadas as classificações das ondas e  $v = \lambda f$ , a equação fundamental da ondulatória, a qual relaciona sua velocidade de propagação ( $v$ ) ao comprimento da onda ( $\lambda$ ) e à frequência da mesma ( $f$ ). Destacamos o fato de que a representação é uma proporcionalidade e não uma dependência funcional, articulando à noção de representação (expressão matemática) de Vergnaud.

Ainda, em relação à equação fundamental, exploramos a proporcionalidade entre frequência e comprimento de onda através da análise do espectro eletromagnético representado na Figura 9 e de um diagrama equivalente para ondas sonoras, Figura 10.

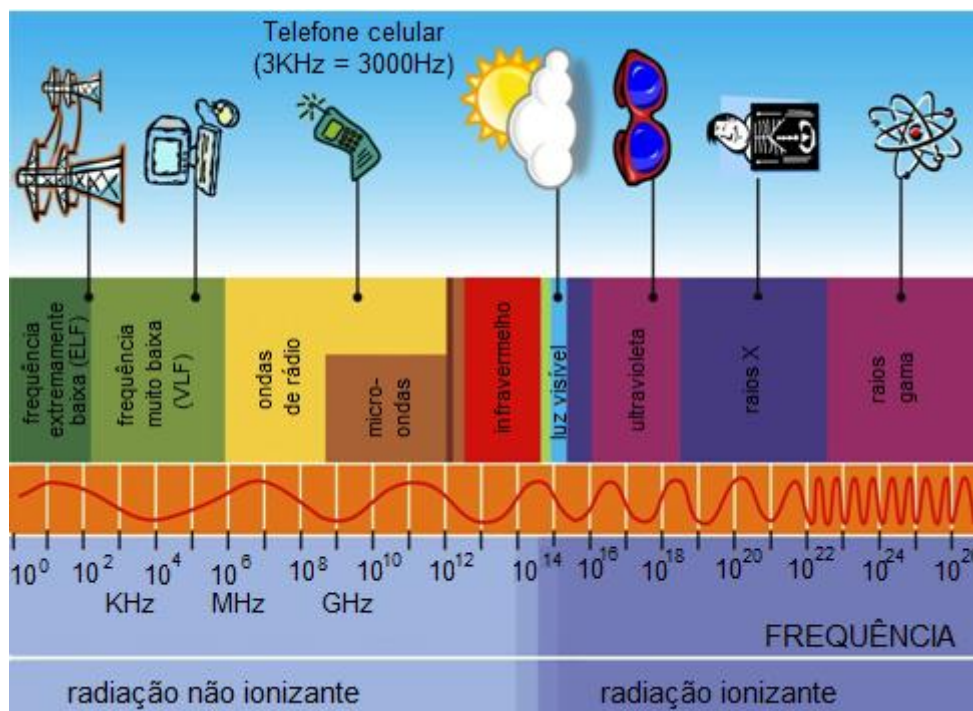


Figura 9 - Representação do espectro eletromagnético.

(Fonte: [http://www.explicatorium.com/CFQ8/Luz\\_espectro\\_eletromagnetico.php](http://www.explicatorium.com/CFQ8/Luz_espectro_eletromagnetico.php))

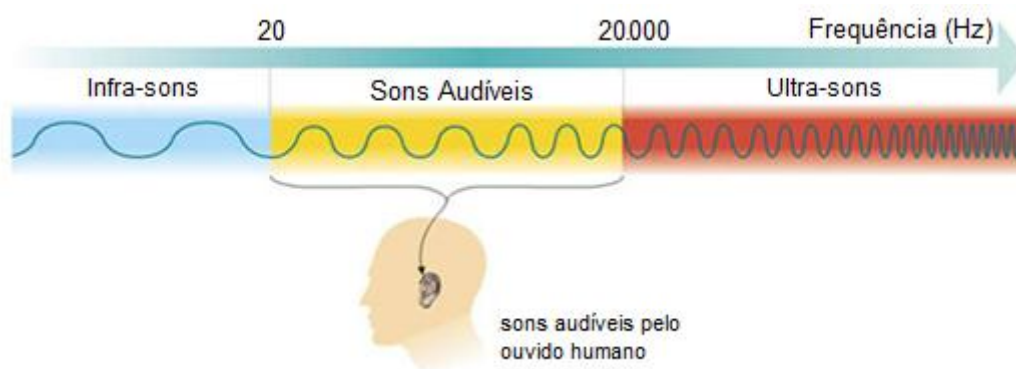


Figura 10 - Representação de ondas sonoras e suas diferentes faixas de frequência. (Fonte: [http://www.aulas-fisica-quimica.com/8f\\_07.html](http://www.aulas-fisica-quimica.com/8f_07.html))

Foram usadas duas simulações para melhor compreensão das grandezas ora apresentadas: a simulação de uma onda na corda (disponível em [http://phet.colorado.edu/pt\\_BR/simulation/wave-on-a-string](http://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/wave-on-a-string)) foi bastante explorada, explicitando os conceitos da equação fundamental, a amplitude das ondas, entre outros; e aquela referente à interferência de ondas (disponível em [http://phet.colorado.edu/pt\\_BR/simulation/wave-interference](http://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/wave-interference)) foi usada nesse primeiro momento apenas para aprofundar a elucidação das grandezas amplitude, comprimento de onda e frequência em relação às ondas na água, som e luz.

As aulas subsequentes foram destinadas à resolução de nove problemas propostos. Um sobre a natureza da luz e do som, outra sobre as diferentes ondas eletromagnéticas, quatro questões traziam representações gráficas de ondas e para sua resolução era necessário avaliar grandezas como amplitude e comprimento de onda, expressos na figura, além de conversões de unidades de comprimento e de frequência, e cálculos de velocidade de propagação. As três questões restantes se restringiram à exploração da equação  $v = \lambda f$  sendo que destas, duas incluíam a análise da proporcionalidade entre a frequência e o comprimento de onda. Os problemas foram resolvidos com os alunos organizados em pequenos grupos e, posteriormente, os grupos iam indicando para que a professora os resolvesse na lousa.

Outra atividade realizada em dupla contava com cinco questões. Na primeira, os alunos eram solicitados a escrever uma definição para onda. A segunda pedia para esclarecer o que faz com que uma onda seja considerada mecânica ou eletromagnética. Na seguinte, era necessário diferenciar ondas transversais de longitudinais. A quarta questão pedia uma representação de uma onda incluindo as indicações de crista, vale, comprimento de onda e amplitude. E, por fim, era necessário escrever a equação fundamental da ondulatória caracterizando cada uma das grandezas. No primeiro momento, as duplas respondiam as questões sem interferência da professora e depois cada dupla ia apresentando suas respostas para que toda a turma avaliasse e elaborasse conjuntamente uma resposta mais adequada e completa. Os próprios alunos atribuíram nota às suas atividades levando em conta a discussão.

Na aula seguinte, foi apresentado o fenômeno da polarização por meio da leitura de textos e observação de imagens tanto estáticas quanto animadas. Os textos utilizados sobre polarização esclareciam que cada lente dos óculos usados no cinema 3D funciona como um polarizador diferente, selecionando os raios de luz numa direção específica e que a combinação das visões dos dois olhos é que cria o efeito de volume tridimensional. O

primeiro texto, disponível em <http://mundoestranho.abril.>, trazia essas informações de modo bastante sucinto e como segundo utilizamos um trecho disponível em <http://www.vocesabia.net/>. Esse último esclarecia que existe mais de uma possibilidade tecnológica para criação da imagem tridimensional. Nosso recorte dava destaque à tecnologia mais comum nos cinemas hoje em dia, que utiliza a polarização por meio dos óculos e, ainda, dispunha de uma figura explicativa bastante simples e didática.

Um par de óculos polarizador usado em cinema 3D foi mostrado aos alunos, os quais foram orientados a observar a luz emitida pela tela dos seus celulares através das lentes dos óculos e girar a lente durante a observação. A aula foi encerrada com a representação de um polarizador através de uma peneira de barbante, cuja malha não era quadriculada, mas paralela em um único sentido. Palitos de fósforos eram soltos sobre a peneira e só a atravessaram aqueles palitos que estavam alinhados com a malha da peneira.

As duas atividades seguintes seguiram ordens diferentes nas duas turmas analisadas por questões técnicas. Em um dos dias, não havia tomada elétrica funcionando na sala e em outra ocasião, o conector do projetor não encaixava na tomada disponível e o adaptador havia sido extraviado. Em uma das turmas, iniciamos a realização da primeira atividade com o software *Modellus*, disponível na Figura 40 do apêndice, enquanto na outra foi apresentada antes uma exposição dialogada sobre interferência.

Na execução do primeiro roteiro, foram gastas duas horas-aula de 50 minutos cada. Na primeira aula, os alunos foram orientados a se organizar em grupos, foram disponibilizados um *netbook* e um roteiro da atividade para cada grupo. Os alunos fizeram, juntamente com a professora, a leitura do item instrutivo do roteiro a respeito da equação do campo elétrico da onda eletromagnética e de sua inserção na janela modelo matemático do programa. A professora alertou aos alunos que fariam a análise da onda para um instante de tempo fixo ( $t = 0$ ) variando-se apenas a posição  $x$ . Os alunos foram orientados a salvar o arquivo com as inserções já realizadas e anotar o número do computador que estavam utilizando para continuar a partir daí na aula seguinte.

Dando continuidade à atividade, os alunos retiravam a informação sobre a fase do modelo o que abria a possibilidade de alterar o valor para vários casos na opção parâmetros. Eles criavam, então, gráficos distintos para cada caso e eram indagados sobre a diferença entre os gráficos gerados. A seguir, o roteiro sugeria que modificação semelhante àquela feita

com a fase, fosse realizada com o valor da amplitude  $E_m$ , gerando gráficos com amplitudes diferentes.

A última atividade do roteiro pedia que nova alteração fosse feita na expressão, dessa vez no valor de  $\lambda$ . A identificação da modificação do comprimento de onda foi rapidamente percebida pelos alunos. Mesmo não usando a parte da expressão que se refere ao tempo, na qual seria considerada a frequência. Foi destinado um espaço para que o grupo apontasse sua opinião sobre a atividade, se foi ou não de fácil realização e se contribuiu para a compreensão dos elementos da onda.

Na aula seguinte, ocorreu a apresentação da interferência das ondas. A professora conduziu a aula expositiva, incentivando a participação dos alunos, a partir de uma apresentação em *Power Point*. Esta trazia, além da definição de interferência como superposição de ondas numa mesma região, uma série de imagens de interferência construtiva e destrutiva e os alunos eram levados a concluir qual condição para ocorrer uma ou outra. A seguir puderam observar duas simulações do PhET. A primeira, Interferência de Ondas, já utilizada no início do bimestre (disponível em [http://phet.colorado.edu/pt\\_BR/simulation/wave-interference](http://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/wave-interference)), nesse momento sendo mobilizados os recursos para a criação de ondas na água, som e luz a partir de duas fontes. E a segunda sobre o som (disponível em [http://phet.colorado.edu/pt\\_BR/simulation/sound](http://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/sound)) que tem a opção de ativar o alto-falante para percepção do silêncio nas regiões de interferência destrutiva e do barulho quando a interferência é construtiva.

Passamos para a segunda atividade usando o software (Figura 59 do apêndice). Esta também ocupou dois horários de 50 minutos cada. A atividade iniciou-se com a inserção de duas equações da intensidade do campo elétrico em função da posição,  $E_1$  e  $E_2$  com aspecto semelhante à utilizada na primeira atividade e da equação da onda resultante  $E = E_1 + E_2$ , conforme Equação (1) da Seção 2.1. A primeira orientação fornecia dados de entrada (comprimento de onda, amplitude e fase) iguais para as equações de  $E_1$  e  $E_2$  e pedia que fossem gerados os três gráficos:  $E_1$ ,  $E_2$  e  $E$ . Eram, então, indagados sobre quantos e quais gráficos podiam ser visualizados. Com boa visualização dos três gráficos no mesmo sistema coordenado, a questão seguinte se referia ao tipo de interferência ocorrida entre  $E_1$  e  $E_2$ , naquele caso. Foram perguntadas as condições para que a interferência fosse totalmente destrutiva.

As próximas etapas faziam menção à interferência entre ondas com comprimentos e frequências diferentes, primeiramente os comprimentos eram bem distintos e posteriormente eram ligeiramente diferentes para mostrar o fenômeno dos batimentos. Novamente a atividade contava com um espaço destinado à opinião do grupo.

A difração foi assunto para a aula seguinte e a professora iniciou as discussões pedindo que um aluno saísse da sala e falasse alguma coisa do outro lado da parede. O conceito de difração foi então apresentado em slides juntamente com a condição de que para que ocorra o efeito o obstáculo ou fenda precisa ter dimensão da ordem do comprimento da onda o que para o som acontece facilmente e com a luz exigiria obstáculos de dimensões que não observamos no nosso cotidiano (da ordem da espessura de um fio de cabelo).

Imagens ilustravam a difração com ondas na superfície da água e ondas de rádio. Recorrendo à simulação já utilizada em aulas anteriores (disponível em [http://phet.colorado.edu/pt\\_BR/simulation/wave-interference](http://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/wave-interference)) observamos a difração de ondas em água, ondas sonoras e luz em uma e em duas fendas. Foi exibido um vídeo sobre a difração de ondas retas em uma cuba de ondas (disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=W1te-QiFXbs>) e com um apontador laser verde e um fio de cabelo foi criado o efeito de difração na sala. Usando o laser e um CD foi obtida outra imagem de difração. A partir da sugestão de um aluno, a professora incidiu o laser sobre a película protetora da tela de seu telefone celular o que resultou numa figura de difração diferente daquelas projetadas anteriormente.

Voltando aos slides, uma imagem ilustrativa do princípio de Huygens foi apresentada e em outra imagem, como a indicada na Figura 3, a professora considerou a condição para que em cada ponto da projeção houvesse uma linha clara ou escura seria que a interferência entre as ondas oriundas dos vários pontos da fenda fosse construtiva ou destrutiva, respectivamente. Na intenção de esclarecer melhor essa condição, a professora foi desenhando comprimentos de onda sobre a projeção ao longo dos dois caminhos indicados na figura. Considerou que caberiam muitos comprimentos, uma vez que este valor para a luz é muito pequeno e propôs aos alunos que considerassem, após um dos caminhos estar completamente cheio com os comprimentos, no outro ainda caberiam alguns – indicando a diferença de caminhos e que a quantidade de comprimentos naquela região determinaria o tipo de interferência.

Para finalizar, a professora propôs a expressão  $d = n \lambda/2$ , na qual  $d$  é a diferença de caminho e  $n$  um número inteiro e, sempre que fosse par, a interferência seria construtiva. Caso  $n$  seja ímpar, a interferência seria destrutiva.

Na aula seguinte utilizamos novamente o programa *Modellus*, dessa vez para criar o gráfico da equação  $I = I_m \left( \frac{\sin(\frac{2\pi x}{\lambda})}{x} \right)^2$ , que fornece a intensidade da amplitude da onda resultante da difração em função da posição no anteparo.

Nessa atividade foram solicitadas observações do gráfico e análise dos dados do mesmo. Inicialmente, o roteiro perguntava para quais valores de  $x$  o efeito era perceptível ou insignificante. A pergunta seguinte se referia aos zeros do gráfico na região onde o efeito é perceptível. A última parte deste roteiro pedia que identificassem a intensidade da luz no máximo central, nos dois próximos e comparasse seus valores. Como nas atividades anteriores, esta contava com um espaço destinado à opinião do grupo.

Em virtude da finalização do bimestre letivo, com a realização das provas bimestrais e, posteriormente, das recuperações, a sequência precisou ser interrompida e foi retomada no início do quarto bimestre. Como se passaram vários dias da realização das atividades foram utilizadas mais três aulas de 50 minutos cada para o fechamento do estudo piloto. Por meio de apresentação em *power point*, foram retomados os conceitos a partir das perguntas usadas no questionário preliminar. As questões foram apresentadas e, usando imagens e animações, os conceitos iam sendo revistos. Na primeira das três aulas, as duas perguntas iniciais do questionário levaram ao conceito, às classificações das ondas, seus elementos e à equação fundamental da ondulatória. Foi possível também rever os espectros sonoro e eletromagnético diferenciando as várias faixas dos mesmos e comparando suas frequências e comprimentos de onda. A segunda aula se destinou ao tratamento da acústica. A partir da questão que pedia a diferença entre som musical e ruído foram trabalhadas fontes e qualidades sonoras. Na última aula utilizada na sequência foi retomado o conceito de polarização que é bastante usado nas projeções 3D dos cinemas atuais e apresentada a holografia.

A partir das imagens apresentadas na Figura 11 foi esclarecido o processo para a criação do registro holográfico (11A) e para a reprodução da imagem a partir deste registro (11B).

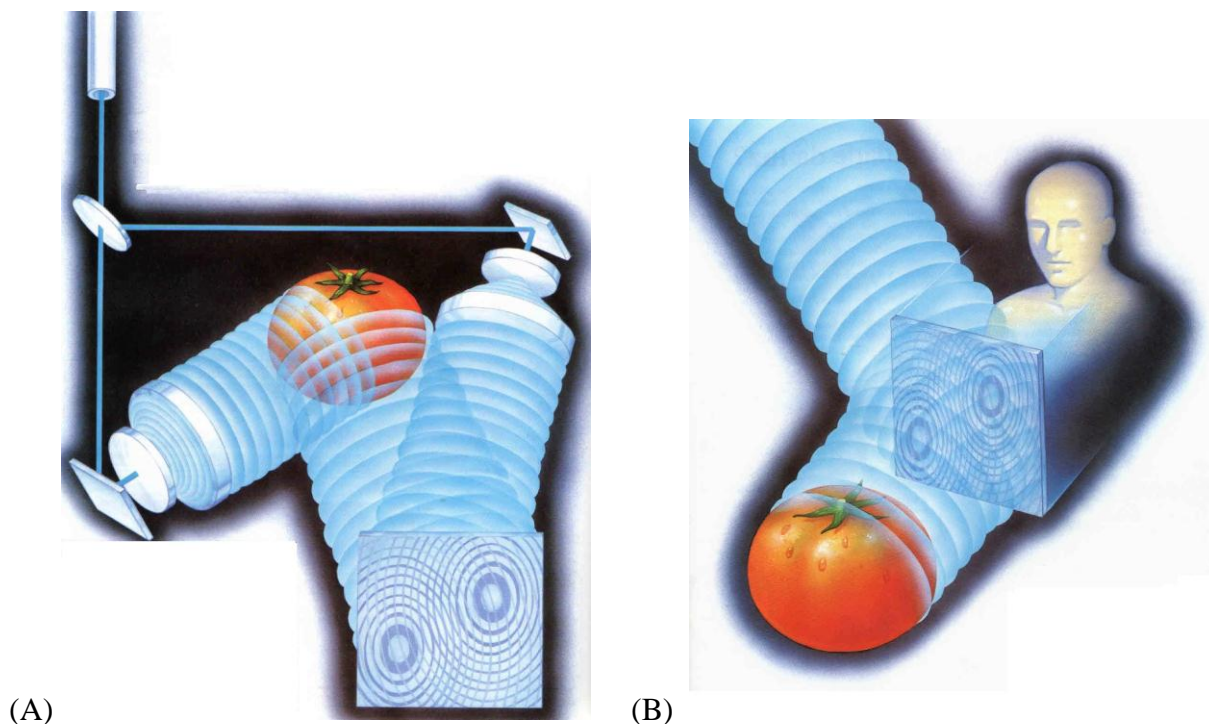


Figura 11 - (A) Representação da criação do registro holográfico da imagem de um objeto e da (B) reprodução da mesma a partir do registro. (Fonte: Ciência e Natureza: Forças Físicas, 1996. p.124 e 125.)

Foi esclarecido que, para a criação do registro na película fotossensível, é preciso que o laser seja dividido em dois feixes que seguem caminhos diferentes. Um desses feixes passa pelo objeto a ser holografado e o outro (o feixe de referência) segue para a película e as franjas de interferência entre tais feixes são gravadas na película.

Sobre a projeção da Figura 11A a professora indicou os caminhos dos feixes e lembrou que a diferença entre esses caminhos é que define se, no ponto correspondente da película, haverá interferência construtiva ou destrutiva, de acordo com a equação trabalhada em aula.

Diante da projeção da Figura 11B, a professora destacou que, para reproduzir a imagem, um laser de mesmo comprimento de onda daquele usado na produção do holograma, sofrerá difração nas franjas como se atingisse o próprio objeto. Nesse momento, ela levou os estudantes a se lembrarem da condição para que aconteça a difração: que a espessura das franjas registradas na película tenha a mesma ordem de grandeza que o comprimento da onda incidente nelas e que por esse motivo o laser usado para a reprodução da imagem deve ter o mesmo comprimento de onda daquele usado para a criação do registro.

Posteriormente, a professora mostrou a imagem indicada na Figura 12 que representa uma montagem para produção de hologramas utilizada em laboratórios didáticos como é o caso do Laboratório de Óptica da UNICAMP.

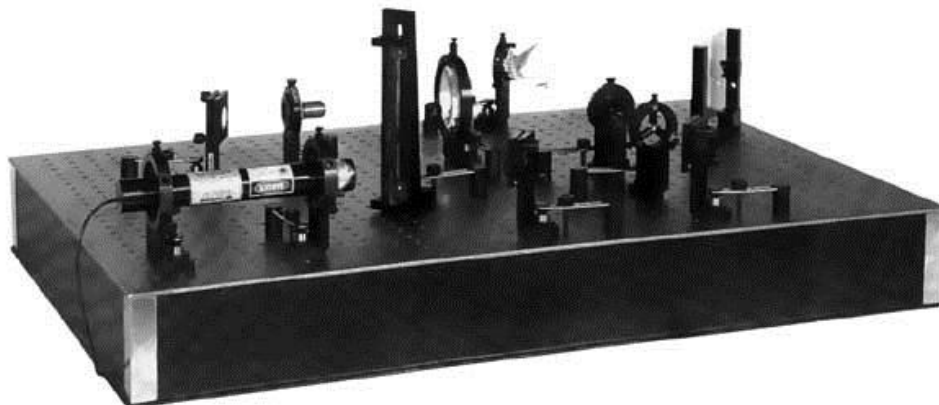


Figura 12 - Montagem para produção de hologramas utilizada no Laboratório de Óptica da UNICAMP (Fonte: <http://www.ifi.unicamp.br/~dfigueir/holosite/holografia/holografia.htm> acesso em 15/09/2014)

Com a Figura 12, a professora destacou que são utilizadas lentes para melhorar os feixes de laser, espelhos para direcionar os feixes, “*beam splitter*” para dividir o feixe em dois caminhos diferentes e a bancada onde são fixadas todas as peças envolvidas, dando estabilidade ao processo.

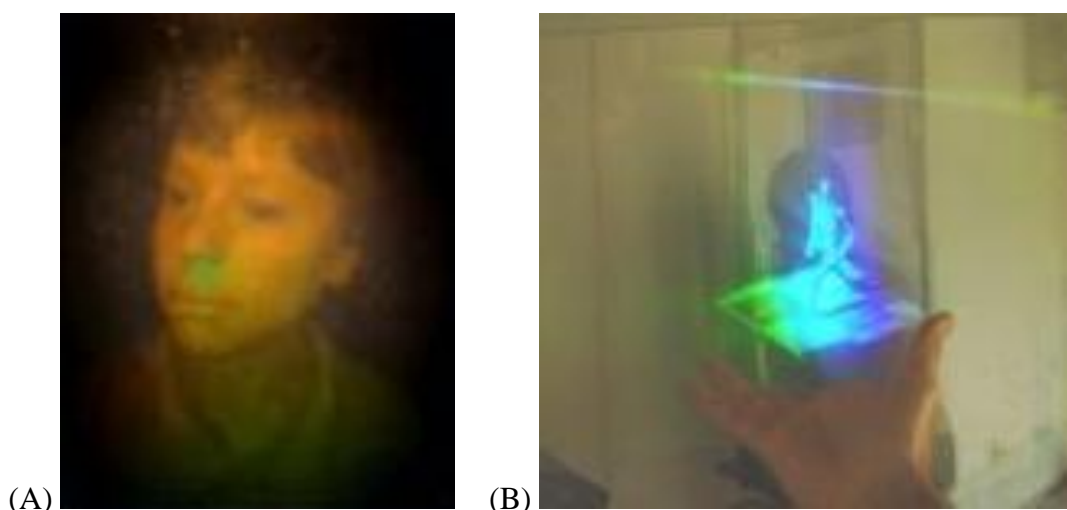


Figura 13 - Hologramas da exposição de holografias do Laboratório de Óptica da Unicamp (Fonte: <http://www.ifi.unicamp.br/~lunazzi/expo.htm> acesso em 15/09/2014)

Foram apreciadas, também, imagens de hologramas produzidos no referido laboratório, como as imagens mostradas na Figura 13, disponíveis no site da exposição

didática gratuita com aula sobre óptica de imagens e demonstrações de hologramas (o evento, que tinha formato áudio visual desde o primeiro semestre de 2003, foi encerrado em fevereiro de 2015). A aula foi encerrada com uma discussão sobre as aplicações da holografia, como o seu uso em shows musicais e os protótipos de uma TV holográfica, projeto do grupo do Laboratório de Óptica da UNICAMP (<http://portal.ifi.unicamp.br/dfmc/lo>).

A partir dos registros do estudo piloto, buscamos refinar e reorganizar as atividades a fim de compor a sequência final. A sequência final foi aplicada na mesma escola em que o estudo piloto foi aplicado, no início do ano letivo de 2015, junto às turmas do segundo ano do ensino médio. Desta vez, foram oito as turmas em que as atividades foram desenvolvidas e, da mesma forma que no estudo piloto, em todas foram realizados os registros escritos, mas apenas em duas foram feitas as gravações em vídeo.

### 3.2. SEQUÊNCIA FINAL

O formato final da sequência didática, que ocupou 16 horas aulas, é apresentado no Quadro 3. São indicadas as atividades propostas para cada situação e, também, as atividades esperadas dos discentes durante sua realização.

**Quadro 3** - Organização da sequência final: atividades propostas e atividades esperadas dos discentes

AULA	ATIVIDADE	ATIVIDADES DISCENTES
1	Questionamento a respeito do que é a luz e qual seu caminho para possibilitar a visão	Responder o questionamento
2	Apresentação do conteúdo a ser trabalhado, da importância da luz e uma linha do tempo sobre a evolução dos conceitos ligados a luz	Observar e participar formulando e respondendo perguntas
3	Questionário Prévio	Responder o questionário
4	Apresentação de slides, vídeos, imagens e textos, simulações (PhET)	Observar e participar, formulando e respondendo perguntas

	sobre os conceitos iniciais	
5	Dedução e utilização da equação fundamental da ondulatória ( $v=\lambda f$ ) e observação dos espectros sonoro e eletromagnético	Observar e participar formulando e respondendo perguntas
6	Apresentação da função senoidal que representa a variação da intensidade do campo da onda – Eq. (1) e do ambiente do software <i>Modellus</i> .	Observar e participar formulando e respondendo perguntas
7,8	Uso do software <i>Modellus</i> para interpretação da Eq. (1)	Manipulação do programa e resposta às questões
9	Interferência de ondas: slides, vídeo, simulações.	Observar e participar formulando e respondendo perguntas
10,11	Uso do software <i>Modellus</i> para representação da interferência entre duas ondas.	Manipulação do programa e resposta às questões
12	Atividade prática utilizando a “máquina de ondas”, a “mola maluca” e uma mola helicoidal longa.	Manipular os materiais e observar os pulsos e ondas originados.
13	Difração: slides, vídeo, simulação, demonstração com laser	Observar e participar formulando e respondendo perguntas
14	Uso do software <i>Modellus</i> para representação da difração	Manipulação do programa e resposta às questões
15	Polarização: leitura de textos, observação dos óculos, imagens, animação e peneira de barbante	Leitura, observações e questionamentos
16	Fechamento da sequência retomando o tema gerador holograma.	Observar e participar formulando e respondendo perguntas

Fonte: próprio da autora

No primeiro contato com os estudantes, além das apresentações, foi perguntado o que eles acreditavam que seria a luz e qual o caminho percorrido por ela para possibilitar a visão.

O ano letivo teve início com a apresentação da programação da disciplina. O fato de 2015 ter sido proclamado o Ano Internacional da Luz e das Tecnologias baseadas em Luz pela Assembleia Geral das Nações Unidas foi apontado como justificativa para tratar o assunto “luz” desde o início do ano letivo (normalmente o assunto é abordado apenas no segundo semestre). Foi perguntado aos alunos por que eles acreditavam que a luz é importante e a seguir, foram apresentadas algumas das importâncias da luz, elencadas no sítio oficial da UNESCO sobre a celebração (<http://www.unesco.org/new/pt/brasil/ia/about-this-office/prizes-and-celebrations/2015-international-year-of-light/>).

Diferentemente do estudo piloto, foi oportuno apresentar uma linha do tempo. Nela apareciam desde nomes como Pitágoras, com sua teoria da chama dos olhos, até Einstein e seus trabalhos sobre fóton e relatividade, passando por Euclides, AlHazen, Huygens, Newton, Young, Fresnel e Maxwell. A discussão realizada e os detalhes das informações históricas estão detalhados no produto, no Apêndice desta dissertação.

As aulas de números 3, 4 e 5 da sequência final correspondem às aulas 1, 2 e 3 do estudo piloto, respectivamente.

Uma aula foi usada para apresentar a equação do campo elétrico de uma onda eletromagnética e o software *Modellus* a ser utilizado nas aulas subsequentes. Através da projeção de imagens e da simulação “ondas de rádio e campos eletromagnéticos” (disponível em: [https://phet.colorado.edu/pt\\_BR/simulation/legacy/radio-waves](https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/radio-waves)) destacamos que, para representar a periodicidade da oscilação dos campos elétrico e magnético da onda, a função trigonométrica é a mais adequada. Denotando  $E$  a intensidade do campo elétrico,  $A$  a amplitude (intensidade máxima do campo),  $k$  número de onda,  $\omega$  a frequência angular e  $\phi$  a fase, destacamos que as equações  $E = A \cdot \cos(k \cdot x - \omega \cdot t + \phi)$ , ou  $E = A \cdot \sin(k \cdot x - \omega \cdot t + \phi)$  são igualmente válidas e passamos a compreendê-las melhor. Para isso foi utilizada uma imagem (disponível em: <http://pensevestibular.com.br/topicosdematematica/trigonometria/seno-cosseno-e-tangente-no-circulo-trigonometrico>) do ciclo trigonométrico e as animações indicando o seno e o cosseno (disponíveis em <http://www.mat.ufpb.br/lenimar/animacoes.htm>) tanto no ciclo quanto a formação dos gráficos para um período completo. A seguir foram observadas as análises de duas equações e seus gráficos com o software *Modellus*,  $E = \cos(t)$  e  $E = \sin(x)$ . Para cada uma delas eram modificados parâmetros para que os alunos percebessem a diferença na

amplitude, período e comprimento de onda. Foi solicitado aos estudantes que elencassem a principal diferença entre os gráficos formados utilizando as funções seno e cosseno.

As aulas de números 7, 8, 9, 10 e 11 da sequência final correspondem às aulas 9, 10, 11, 12 e 13 do estudo piloto, respectivamente.

Dois alunos, que haviam perdido uma avaliação, pediram que outra atividade fosse realizada a fim de substituir a primeira e um deles disse que gostaria de realizar uma atividade prática demonstrativa sobre ondas. Essa aula foi destinada à apresentação dos alunos para apreciação da turma que realizou avaliação dos mesmos. Com um brinquedo chamado “mola maluca”, eles mostraram um pulso e um conjunto de pulsos na mola sobre a mesa do professor. Consideraram a diferença entre ondas transversais e longitudinais e ainda esclareceram que só mostrariam ondas mecânicas. A seguir passaram a utilizar um arranjo em que palitos de picolé colados em um elástico oscilavam. Com o arranjo fizeram considerações sobre ondas transversais e longitudinais, mostraram fenômenos como reflexão e interferência. Ao formarem ondas estacionárias a professora auxiliou na explicação. A seguir refizeram as atividades, dessa vez com uma mola.

As aulas de números 13, 14 e 15 da sequência final correspondem às aulas 14, 15 e 8 do estudo piloto, respectivamente.

A sequência foi encerrada numa aula que retomava o tema holograma. Inicialmente foi apresentada uma breve contextualização histórica da criação do holograma e do laser que tornou possível sua execução dando ao elaborador da técnica, Dennis Gabor, o prêmio Nobel em 1971. As imagens holográficas indicadas na figura 5 foram apresentadas, além de usos da holografia como prova de autenticidade de produtos como nos cartões de crédito, em CDs, DVDs e até na nota de 20 reais. Também foram incluídas na apresentação imagens de shows musicais em que os artistas apareciam de forma supostamente holográfica.

A partir das imagens apresentadas na figura 11 foi esclarecido o processo para a criação do registro holográfico (11A) na película sensível e para a reprodução da imagem a partir deste registro (11B).

Com o intuito de dar melhor visibilidade ao processo de criação do registro, no qual o laser é dividido em dois feixes que seguem caminhos diferentes e as franjas de sua interferência são gravadas na película, foi apresentada a animação disponível em

<http://www.tecmundo.com.br/holografia/4343-holografia-o-3d-ja-esta-com-os-dias-contados-.htm>.

Sobre a projeção da figura 11A a professora indicou os caminhos dos feixes e lembrou que a diferença entre esses caminhos é que define se, no ponto correspondente da película, haverá interferência construtiva ou destrutiva, de acordo com a equação trabalhada em aula. O procedimento de indicar os caminhos dos feixes e considerar sua diferença na formação da interferência também foi realizado com a animação supracitada.

Diante da projeção da figura 11B, a professora destacou que, para reproduzir a imagem, um laser de mesmo comprimento de onda daquele usado na produção do holograma, sofrerá difração nas franjas como se atingisse o próprio objeto. Nesse momento levou os estudantes a se lembrarem da condição para que aconteça a difração: que a espessura das franjas registradas na película tenha a mesma ordem de grandeza que o comprimento da onda usada na reprodução da imagem.

Posteriormente a professora mostrou a imagem indicada na figura 12 que representa uma montagem para produção de hologramas utilizada em laboratórios didáticos como é o caso do Laboratório de Óptica da UNICAMP. Ainda com a figura 12 a professora destacou que são utilizadas lentes para melhorar os feixes de laser e a bancada onde são fixadas todas as peças envolvidas, dando estabilidade ao processo.

A maior diferente entre a sequência final e o estudo piloto foi a inclusão de duas atividades. Em uma aula foi realizada uma discussão das funções trigonométricas e apresentação do ambiente do software *Modellus*. A discussão foi necessária, pois os alunos ainda não haviam tido contato com tais funções no conteúdo de matemática. E a outra inclusão que se mostrou pertinente para dar visibilidade aos elementos da onda, foi a atividade de manipulação das molas e da máquina de ondas.

#### 4. RESULTADOS

Considerando a teoria dos campos conceituais, o Quadro 4 indica uma organização dos invariantes mobilizados e as representações utilizadas em cada situação vivenciada pelo aluno durante a aplicação da sequência. Neste, as situações foram agrupadas de acordo com as representações e invariantes mobilizados.

**Quadro 4 - Invariantes e Representações mobilizados para cada situação da sequência.**

<b>Situação</b>	<b>Invariantes</b>	<b>Representação</b>
Linha do tempo	Ordenação cronológica dos fatos	Diagramas apresentados em <i>power point</i>
Responder o questionário e observar a apresentação de slides, vídeos, imagens e textos, simulações (PhET) sobre os conceitos iniciais	Associar os elementos da onda às grandezas representadas nas imagens.	Diagramas da “ôla” e da holografia. Representação gráfica das ondas
Dedução e utilização da equação fundamental da ondulatória e compreensão dos espectros sonoro e eletromagnético	Utilização do raciocínio proporcional. Identificação das diferentes faixas de frequências e do respectivo tipo de onda.	Equação fundamental da ondulatória. Representação gráfica e diagramática dos espectros
Atividades com o software <i>Modellus</i> para compreensão dos elementos da onda	Associação das grandezas com os parâmetros correspondentes na equação e com as distâncias modificadas no gráfico	Leitura de Tabela Equação Gráficos
Atividades sobre interferência e difração com exposição de imagens, vídeos, e uso de simulações e do software <i>Modellus</i>	Princípio de Huygens Princípio de Superposição Experimento de Young Abstração relativa ao número de comprimentos de onda	Equações e Gráficos na soma de equações Diagrama da fenda dupla
Polarização	Noção de propagação espacial com vibração em diferentes planos	Analogia da peneira
Retomada dos conceitos e análise da formação holograma	Tomada de consciência do processo	

Fonte: Próprio da autora.

A aplicação do estudo final, no início do ano letivo de 2015, contou com a participação de 306 alunos do segundo ano do ensino médio regular do turno matutino de uma escola estadual da cidade de Uberlândia. No entanto, devido à intensa movimentação dos estudantes nas turmas, em virtude de transferências, remanejamentos e também de faltas, apenas 207 participaram dos questionários aplicados antes do início e após a finalização das atividades da sequência.

Para fazer referência aos alunos, resguardando suas identidades, utilizaremos aqui um código com o formato X99, no qual a letra se refere à turma do estudante e o número os diferencia dentro da mesma. A numeração atribuída a cada estudante foi determinada aleatoriamente, de forma que apenas a pesquisadora poderia identifica-los. De forma semelhante, criamos um código para fazer referência aos grupos de trabalho, pois as atividades com o software foram realizadas em grupos. Nesse caso, o código terá o formato G9X, em que a letra inicial indica que o trabalho foi realizado em grupo, o número faz menção ao número do grupo na sala e a última letra indica a qual turma o grupo pertence. Os questionamentos e a participação dos alunos na realização das atividades se apresentaram muito semelhantes nas oito turmas em que as mesmas foram aplicadas.

Quando perguntados sobre o que acreditavam ser a luz, na primeira aula, conforme descrição do Quadro 3, os alunos evidenciaram não ter pensado a respeito anteriormente, então a professora disse que eles não deveriam se preocupar caso a resposta que imaginaram parecesse não ter sentido, pois essa pergunta incomodou a humanidade por muitos séculos. Diante disso, o aluno G5 mencionou que não respondeu por que realmente não tinha nenhuma noção do que seria a luz e praticamente em coro, os demais concordaram.

Na tentativa de suscitar uma discussão, a professora pediu que pensassem no caminho que a luz descreve para possibilitar a visão. Depois de alguns instantes em silêncio, para que os alunos refletissem a respeito, a professora perguntou qual o caminho da luz para que cada um dos presentes na sala visse o quadro na parede. O aluno D21 prontamente respondeu que a luz saía dos seus olhos e chegava ao quadro. E antes que qualquer um pudesse contra-argumentar, ele mesmo concluiu *“Claro que não, eu não tenho uma fonte de luz nos olhos; a luz tem que estar vindo do quadro! Mas como, se o quadro também não gera luz?!”* A resposta veio da aluna D8 *“A luz veio do sol! Ela bate no quadro e quando vem para os nossos olhos a gente consegue ver.”* Nesse momento, a professora não concordou nem discordou das respostas dos alunos, mas perguntou para a turma se eles concordavam com

aquelas explicações. Alguns alunos discordaram e continuaram afirmando que a luz saía dos olhos e, aquele estudante que explicitou seu raciocínio inicialmente, o D21, foi quem os convenceu argumentando que, se a luz saísse dos olhos, não seria necessário acender lâmpadas na ausência da luz solar.

Após a apresentação da programação da disciplina, a professora perguntou aos alunos por que eles acreditavam que a luz é importante. A aluna E9 respondeu *“Pra mim, o fato de conseguir enxergar já faz a luz importante o suficiente para querer saber mais sobre ela e esse processo.”* E, como toda a turma concordou com ela, a professora apresentou algumas das importâncias da luz, elencadas no sítio oficial da UNESCO sobre a celebração de 2015 como o Ano Internacional da Luz e das Tecnologias baseadas em Luz (<http://www.unesco.org/new/pt/brasil/ia/about-this-office/prizes-and-celebrations/2015-international-year-of-light/>).

Ainda na mesma aula, foi apresentada uma linha do tempo destacando os principais nomes de cientistas envolvidos na formação do conhecimento acerca da natureza da luz e da sua propagação e indicando brevemente aspectos dos trabalhos dos mesmos. A linha do tempo está indicada na Figura 1 do Apêndice e, sobre ela foram projetadas as imagens dos pensadores constantes dos Anexos 2, 3 e 5 do mesmo apêndice.

Na terceira aula, durante a aplicação do questionário preliminar, indicado na Figura 7 do Apêndice, muitos alunos se queixaram de que, responder questões desse tipo é mais difícil que fazer prova. Mas diante da observação de que não seriam considerados acertos e erros em suas respostas para avaliação da atividade, cuja finalidade seria subsidiar a organização das aulas subsequentes, a maioria dos estudantes se empenhou em responder. O aluno B17 chamou a professora em sua carteira para dizer que não tinha nem ideia do que se tratavam as perguntas, a começar pela primeira. A professora perguntou, então, se ele já tinha participado ou visto alguma “ôla”. Diante da resposta afirmativa, questionou se ele não tinha nenhuma ideia do que poderia ser esse ente físico a que a pergunta se referia. O aluno respondeu que imaginava uma coisa, mas que essa coisa não teria relação nenhuma com o conhecimento físico. E, após a insistência da professora, ele disse que imaginou uma onda. A professora o lembrou da apresentação do programa da disciplina, feita na aula anterior, na qual ela apontou que onda seria um dos temas tratados ao longo do ano. Ele argumentou que havia faltado na aula anterior, mas já que era sobre isso, ele teria algumas respostas para escrever no questionário.

Em cada turma, algum aluno fez pergunta semelhante à citada, de forma que, ao entregar o questionário, cerca de 80% dos estudantes responderam que o ente físico a que a coreografia da “ôla” se assemelhava era a onda. Entre os outros 20%, a maior parte das respostas apenas considerava que a “ôla” criava uma ilusão de óptica. Menos de 1% dos alunos, que indicaram as ondas como resposta da primeira questão, tentaram descrever alguma de suas características, se atentando especialmente para o movimento oscilatório, como no caso do aluno F7 que escreveu *“a onda tem movimentos para baixo e para cima”* e da aluna B32, a qual escreveu *“Esse ente físico é uma onda. Suas características são os picos altos e baixos à mesma frequência”*. Essas afirmações recorrem a representações mímicas, muito usuais quando a pessoa que aprende ainda não dispõe do vocabulário apropriado para a descrição e/ou representação do fenômeno.

Ao responder a questão sobre a busca pelo avião desaparecido ou partes dele, a maioria dos alunos usa termos como rastreador, satélite, torre de controle e caixa preta, sem relacionar esses elementos a algum tipo de onda, como na resposta da aluna C1, afirmando: *“no ar são satélites já no oceano pela caixa preta”* (sic). Alguns poucos alunos, entretanto, consideraram o uso de ondas de rádio sendo transmitidas a computadores e o uso de sonares para buscas na água, mas não deixando evidências do que seriam as ondas de rádio ou os sonares, nem o papel do computador nessa decodificação. Fica patente que, a tecnologia é, usualmente, percebida como “caixa preta” pelo cidadão comum, sem maiores preocupações com seu funcionamento.

Analisando a diferença entre som musical e ruído, percebemos que vários estudantes tem algum conhecimento musical, pois usam termos como harmonia e melodia, mas não fazem referência à diferença entre as ondas sonoras envolvidas em cada caso. A maioria dos alunos se restringe a repetir os dados da pergunta, considerando que o som musical é um som agradável, ao contrário do ruído.

Na maior parte das respostas à questão que tratava dos filmes 3D exibidos nos cinemas, os estudantes afirmaram se tratar de ilusão de óptica. Alguns deles, como a aluna H12 que escreveu *“penso ser formada por mais de uma imagem”*, consideravam a projeção em 3D formada por imagens distintas, mas, ainda não evidenciava a percepção da relação com as ondas luminosas.

Entre os alunos que responderam a última pergunta desse questionário, muitos atribuem ao avanço tecnológico, as possibilidades atuais ou futuras para a criação e uso dos

hologramas, como o aluno C34, que afirma *“cada vez mais a tecnologia vem avançando e com novas coisas ‘legais’. Daqui uns anos vai ser possível fazer uma pessoa em uma sala com os hologramas.”* Fica evidente, novamente, o desconhecimento dos processos e mecanismos que a tecnologia referida trilhará para esse desenvolvimento, ou mesmo que são as pessoas comuns que criam essas tecnologias. Outros dizem que o holograma não é possível, sendo criado apenas para os filmes através de computação gráfica – ou seja, uma ilusão criada para entretenimento. A resposta dada pelo aluno B9 *“uma tela exibe a imagem na horizontal e essa imagem é refletida por um vidro à 45° que reflete parte da luz enquanto outra parte se dissipa atrás da imagem”*, mostra que o mesmo tem conhecimento a respeito do falso holograma, técnica que tem sido usada para mostrar a imagem de artistas já falecidos em shows. Apesar das variadas respostas dadas pelos alunos, não foi identificada nenhuma que indicasse conhecimento acerca dos fenômenos envolvidos na criação do holograma.

A terceira aula foi iniciada com a retomada das perguntas do questionário que se deu a partir de imagens projetadas. As imagens iam sendo abertas a partir dos links criados no slide inicial, mostrado na Figura 8 do Apêndice. Para representar a “ôla”, utilizamos a animação disponível em <http://www.acs.psu.edu/drussell/Demos/waves-intro/waves-intro.html> e representada pela Figura 9 do Apêndice. Nesse momento, os alunos concluíram que, o ente físico ao qual a questão se referia era a onda. A professora esclareceu, então, que toda aquela apresentação inicial sobre a importância da luz e como a humanidade pensou sua natureza e propagação, somada às situações analisadas no questionário indicavam o objetivo das aulas subsequentes: o tratamento da luz segundo o modelo ondulatório.

Ao apresentar a imagem da Figura 10 do Apêndice, a professora esclareceu que se tratava da imagem de possível parte do avião desaparecido, feita por um satélite chinês e veiculada nos meios de comunicação, à época das buscas. Perguntou como aquela imagem poderia ter sido criada. Vários alunos responderam que a imagem é feita pelo satélite. O estudante D21 entrevistou, considerando que, como o questionário falava da maneira de rastrear um avião em vôo, o RADAR seria a melhor resposta. Concordando com o aluno e tentando provocar toda a turma a participar da discussão, a professora perguntou como seria o funcionamento desses equipamentos. Segundo o aluno D6, só poderia ser através de ondas, uma vez que este era o assunto das aulas naquele bimestre letivo. A professora confirmou que tais instrumentos fazem uso de ondas e, de forma simplificada, funcionam emitindo ondas, as quais atingiriam o objeto observado e seriam captadas e analisadas, ao retornar após a reflexão no mesmo. A professora recolocou, então, a pergunta sobre a diferença entre rastrear

um avião ou partes dele no ar ou no fundo do oceano. O aluno D7 respondeu que seria o SONAR. Como não houve maior detalhamento por parte dos estudantes, a professora passou à próxima questão, considerando que a grande diferença entre o RADAR e o SONAR era o tipo de onda utilizada, ondas de rádio no caso do primeiro e sonoras para o último.

Ao mostrar a Figura 11 do Apêndice, para ilustrar a diferença entre música e ruído, a professora percebeu que, intuitivamente, os estudantes atribuíam o primeiro desenho à música e o segundo a um ruído, argumentando, simplesmente, que no primeiro caso a onda mostra harmonia, mas, sem mencionar o que seria harmonia.

Quanto à pergunta sobre a formação da imagem tridimensional exibida nos cinemas atualmente, a imagem da Figura 12 do Apêndice indica como seria a percepção da imagem caso não fossem utilizados os óculos durante a exibição do filme. Diante da figura, os alunos concluíram prontamente que se trataria da sobreposição de imagens e que a percepção tridimensional deveria ser resultado da sua combinação.

Após exibição de um trecho do filme *Resident Evil 3: a extinção*<sup>4</sup>, que mostra uma reunião em que a protagonista aparece de forma holográfica, a conclusão dos estudantes foi de que a criação do holograma deve ser resultado de algum efeito com a luz. Essa criação seria possível, o que seria comprovado pelos shows nos quais artistas já falecidos, apareciam no palco holograficamente. Ainda sem querer avaliar a possibilidade de se criar imagens holográficas, a professora propôs o estudo dos conceitos que permitiriam à turma concluir se tais imagens são possíveis.

A professora definiu, então, uma onda como uma sucessão de perturbações que se propagam e, a partir daí, apresentou exemplos, a fim de elucidar tal definição: a oscilação da superfície de uma lâmina d'água onde caem gotas; uma corda esticada cuja ponta é balançada para cima e para baixo; e uma mola sujeita a movimento para frente e para trás enquanto esticada sobre uma mesa. Percebendo a expressão de vários alunos que ainda não se mostravam satisfeitos com a própria compreensão, a professora recorreu às animações das Figuras 13 e 14 do Apêndice.

Tentando destacar a característica da onda de propagar energia sem transporte de matéria, a professora sugeriu aos alunos a experiência de pensamento em que uma fita

---

<sup>4</sup> RESIDENT EVIL 3: A EXTINÇÃO. Direção: Russell Mulcahy. Constantin Film, New Legacy Films, 2007. 1DVD (94 min)

colorida seria amarrada em um ponto de uma corda, e esta agitada para cima e para baixo de modo a formar uma sucessão de pulsos. Facilmente, os estudantes concluíram que a fita permaneceria amarrada ao lugar inicial, mas então surgiu, na maioria das turmas, a questão proposta pelo aluno A18 “*então, por que na praia a onda arrasta a gente?*”. Buscando envolver a turma, a professora replicou: “*Será que podemos afirmar que, quando a onda do mar quebra na praia, ela ainda se enquadra no conceito físico de onda?*”. Diante da aparente confusão dos estudantes, a professora destacou que, quando chega à praia, a alteração contínua de profundidade modifica, entre outras grandezas, a velocidade de propagação da onda, o que provocaria sua quebra. Procurou ainda, motivá-los expressando que, à medida que fossem conhecendo as características das ondas, essa compreensão seria facilitada. Esclareceu, ainda, que em alto mar, o efeito de quebra não ocorre e, nesse caso, as ondas se enquadram no conceito físico de onda.

Em relação à classificação das ondas, não foi notada nenhuma dificuldade na compreensão da necessidade da onda mecânica em se propagar através da vibração de um meio material. Neste momento, foram assistidas novamente as animações indicadas nas Figuras 13(A) e 14 do Apêndice. O esclarecimento sobre as ondas eletromagnéticas demandou mais tempo, claro, em função da complexidade inerente. Perguntas como “o que é esse campo elétrico e magnético exatamente”, da aluna E9, apareceram em todas as turmas e na tentativa de respondê-las a professora propôs uma analogia do campo elétrico com o campo gravitacional, que pode ser representado por vetores. Traçando vetores no quadro, foi indicando sua oscilação, que incluiria a alteração no módulo e no sentido durante a propagação. Esclareceu também que, para o campo magnético, a análise seria semelhante, mas em um plano perpendicular ao do campo elétrico como mostra a animação indicada na Figura 13(B) do Apêndice. A professora sugeriu, ainda, que a natureza desses campos seria objeto de estudo do terceiro ano do ensino médio e que, neste momento, a intenção era tratar apenas das características ondulatórias.

Quanto à direção de oscilação da onda, a professora percebeu falta de clareza, para vários estudantes, no caso das ondas longitudinais, o que parece ter sido sanado com as animações indicadas na Figura 14 do Apêndice. Na classificação quanto à propagação das ondas, as dúvidas que apareceram foram como a do aluno H28 ao perguntar “*mas a onda na água não deveria ser tridimensional? Ela se propaga em todas as direções!*”, ao que a professora respondeu destacando a observação da Figura 15(B) do Apêndice, sobre a projeção da qual ela fez linhas radiais, indicando algumas das várias direções para onde a onda se

propagaria e perguntou aos estudantes se essas direções incluíam as três dimensões. Aos poucos, eles foram concordando se propagavam apenas em duas dimensões.

Ao iniciar o uso da primeira simulação, Onda na Corda, disponível em <https://phet.colorado.edu/pt/simulation/legacy/wave-on-a-string> e mostrada na Figura 17 do Apêndice, a professora movimentou a chave inglesa em modo manual, a fim de estabelecer uma oscilação irregular na corda. Salientou que, com o modo pulso, não é fácil conseguir manter a frequência das oscilações, por isso o uso do oscilador automático seria uma opção mais apropriada. Destacou, também, que o simulador seria configurado com extremidade sem fim para não ser necessário avaliar, ainda, a reflexão da onda nas extremidades fixa e solta e com valor zero para a perda de energia. Isso não é verificado na prática, pois sempre há alguma perda de energia durante a propagação, mas, a aproximação facilitaria a observação e estudo das grandezas.

A seguir, a professora explorou a função de modificar a tensão na corda para que os alunos observassem como a velocidade da onda se transformava com sua alteração. Ela chamou atenção também para o fato de que os pontos verdes da corda permitiriam observar que cada um oscila na vertical sem deslocamento horizontal, reforçando a ideia de que a onda não transporta matéria. Variando o valor da amplitude no botão correspondente, surgiram perguntas sobre a possibilidade de influência da amplitude da onda na sua frequência e, ao invés de responder, a professora sugeria que os alunos observassem mais atentamente a modificação do parâmetro. Eles já respondiam que uma grandeza não influenciava a outra e, de um modo geral, faziam questão de tentar prever as alterações provocadas por cada modificação na simulação, evidenciando a participação intensa dos estudantes, mesmo numa atividade dirigida, isto é, mesmo sem que cada estudante dispusesse de um computador para executar a simulação.

A professora pediu aos estudantes que ficassem atentos à alteração da frequência, no botão correspondente e, rapidamente, estes perceberam que o comprimento de onda variava em proporção inversa. Esse raciocínio proporcional é fundamental para a compreensão das grandezas envolvidas. A professora destacou, neste momento, que ao se alterar a velocidade da onda através da tensão na corda, haveria modificação proporcional no comprimento de onda. Durante a realização da atividade, sempre se ouvia algum estudante afirmando que *“assim é muito mais fácil entender”*.

Durante o uso da simulação sobre interferência de ondas, disponível em <https://phet.colorado.edu/pt/simulation/legacy/wave-interference>, a professora esclareceu aos alunos que, neste primeiro contato com o simulador, não seriam explorados todos os seus recursos e que os mesmos seriam utilizados ao longo das aulas.

Para cada ambiente apresentado do simulador, mostrado na Figura 19 do Apêndice, foram utilizados os botões de amplitude e frequência ou comprimento de onda, aprofundando a elucidação de tais grandezas. A opção de visualização de partículas para a onda sonora, no ambiente mostrado na Figura 19(B) do Apêndice, praticamente não foi utilizada, pois muitos alunos se queixavam de incômodo visual e até enxaqueca.

No caso da onda na água, a professora escolheu a visualização lateral, mostrada na Figura 20 do Apêndice, e retomou com os estudantes que a onda na superfície do meio é bidimensional. Antes de trocar para a visualização de ondas sonoras, a professora perguntou aos alunos o que seria modificado na simulação. Alguns alunos se arriscavam a dizer que seria da mesma forma que para a onda na água. Quando a professora insistia que se lembrassem da classificação de tais ondas e o motivo da onda na água se mostrar diferente sob outro ângulo, a maioria dos estudantes concluía que a apresentação seria a mesma, em virtude da propagação tridimensional do som e da luz.

A aula seguinte foi iniciada com a professora demonstrando a equação que relaciona a velocidade de propagação da onda com a sua frequência e comprimento a partir da equação de velocidade média, já conhecida dos alunos, que é dada pela razão entre o deslocamento e o intervalo de tempo gasto no mesmo. Queixas como “*estava bom demais pra ser verdade!*” (C12), “*já vai começar os cálculos!*” (B18) e “*só porque eu estava gostando da matéria tem que aparecer essas contas!*” (F12), evidenciam, talvez, dificuldade com a utilização da linguagem matemática enquanto forma de representação dos raciocínios, assim como uma forma de reafirmação da ideia de que física seria um conjunto de fórmulas e que cabe ao estudante, apenas, saber qual delas utilizar.

Durante a exposição do espectro sonoro e a aplicação da equação para determinar os comprimentos de onda que limitam infrassons, sons e ultrassons, não foram ouvidas queixas e a participação dos alunos foi maciça. No entanto, quando cálculos semelhantes foram efetuados para o espectro eletromagnético, as queixas emergiram em todas as turmas, e em geral tinha o mesmo conteúdo, como na fala do aluno H35: “*ah não! Essas potências de dez apareceram pra complicar tudo!*” e da aluna C12, insistindo “*eu não disse que não ia ficar*

*bom por muito tempo!?”*. Foi necessário retomar as regras necessárias para efetuar os cálculos envolvendo potências de dez.

Antes de iniciar as atividades da sexta aula, os estudantes receberam uma ficha, como a mostrada na Figura 24 do Apêndice, para acompanhar as análises e fazer anotações. A professora iniciou a aula com a observação da imagem da Figura 25 do Apêndice, a partir da qual considerou que como a onda eletromagnética é formada pela oscilação dos campos elétrico e magnético, e que ambos apresentam a mesma periodicidade em planos distintos, é suficiente escrever a equação para um deles, como no caso das Equações (7) e (8) do Apêndice, descrevendo a intensidade dos campos elétrico e magnético em função da posição  $x$  e do tempo  $t$ . Neste momento, as queixas a respeito das equações foram inúmeras e para conter a ansiedade dos estudantes, a professora disse que a análise da equação seria feita posteriormente com o auxílio de um aplicativo e que este momento seria dedicado à compreensão das funções seno e cosseno.

A professora apresentou a simulação Ondas de rádio, representada na Figura 26 do Apêndice e disponível em [https://phet.colorado.edu/pt\\_BR/simulation/radio-waves](https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/radio-waves), para melhorar a percepção dos alunos relativa à propagação e oscilação do campo elétrico. A simulação foi utilizada na função oscilar e exibindo a curva com vetores, chamando a atenção dos alunos para o fato de que a propagação da onda no espaço é representada pela linha, enquanto a representação da oscilação do campo em cada ponto fica a cargo dos vetores. A pedido de alguns estudantes, foram exploradas as demais funções do simulador.

Sabendo que os alunos ainda não haviam tido contato com as funções trigonométricas, a professora usou a animação sobre o ciclo trigonométrico, disponível em <http://pensevestibular.com.br/topicosdematematica/trigonometria/seno-cosseno-e-tangente-no-circulo-trigonometrico> e mostrada na Figura 27 do Apêndice, bem como as animações disponíveis em <http://www.mat.ufpb.br/lenimar/animacoes.htm> e <http://www.mat.ufpb.br/lenimar/animacoes.htm> sobre o seno e o cosseno, respectivamente.

Para que os estudantes comesçassem a se familiarizar com o software *Modellus*, a professora apresentou uma análise das funções  $E = \cos(t)$  e  $E = \sin(x)$  e suas variações em amplitude, período e comprimento. Foi esclarecido aos alunos que os ajustes necessários para a atividade seriam repassados quando eles iniciassem as atividades em grupo.

Enquanto os gráficos eram exibidos com o projetor multimídia, os alunos participavam da análise de suas características e os esboçavam na ficha mostrada na Figura 24 do Apêndice. Nesse caso, a dificuldade dos estudantes aparecia quando precisavam fazer o desenho das variações do gráfico, como no caso de modificar a amplitude ou o período da onda. Foi preciso que a professora os orientasse na criação da escala e que para facilitar a comparação entre os diversos gráficos a mesma escala fosse mantida em todos os desenhos.

Ao final da atividade, não foi óbvio para os estudantes, a diferença entre os gráficos comparando o seno e o cosseno, mas a professora ia sugerindo que observassem o ponto inicial de cada um deles ou que escolhessem outro ponto qualquer e o buscassem em cada gráfico, até que perceberam que os gráficos do seno e o do cosseno ficam “*desencontrados*” como concluiu a estudante E10. A professora, então, esclareceu que a diferença está na fase, que é a amplitude local que a onda apresenta em dado ponto.

Para a aula seguinte, os alunos foram orientados a se organizar em pequenos grupos e receberam *netbooks* emprestados pela Universidade Federal de Uberlândia, e um roteiro de atividades, como o apresentado na Figura 40 do Apêndice. Mesmo estando com os comandos para inserção de dados no software em mãos, muitos grupos solicitavam à professora informações de como colocar a fração ou o  $\pi$  no modelo. Para que os alunos percebessem que bastava ter mais atenção à atividade, a professora respondia em tom descontraído: “*se vocês tivessem reparado nas instruções saberiam que para incluir o  $\pi$  é só clicar no botão correspondente na aba modelo!*”. Alguns alunos se queixavam de dificuldades em manipular o software, mas, ainda assim, a professora não precisou fazer muitas intervenções, uma vez que em todas as turmas sempre havia alunos com mais facilidade e que se dispunham a ajudar os colegas.

Após a criação do primeiro gráfico pedido no roteiro de atividades, que se apresenta como na Figura 42 do Apêndice, os estudantes perguntavam à professora se seus desenhos do gráfico estavam corretos e a mesma os alertava para que mantivessem a escala ao longo de todo o gráfico. Em muitos casos, foi preciso orientar também sobre a construção da escala, que não precisa ser igual nos dois eixos, mas que deve ser mantida ao longo do eixo durante a construção do gráfico. Após algumas tentativas, todos os grupos conseguiram desenhar o gráfico, no entanto, cerca de dois terços deles não se lembraram de indicar no desenho a amplitude e o comprimento da onda, como mostram as imagens da Figura 14. Nesta figura, estão representados os trabalhos dos grupos (A) G2A, (B) G1G e (C) G7C. É possível

observar que o desenho apresenta marcas de ter sido apagado várias vezes, indicando a persistência dos estudantes ao realizar a atividade.

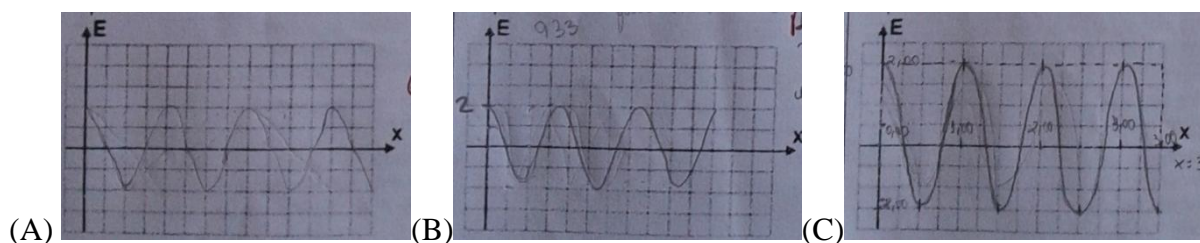


Figura 14 - Gráficos desenhados pelos grupos (A) G2A, (B) G1G e (C) G7C.

A atividade ficou distribuída em duas aulas que não são dadas no mesmo dia, de modo que foi preciso, na segunda, retomar as atividades realizadas anteriormente a fim de dar sequência. Nos itens seguintes do roteiro, os grupos sempre chamavam a professora para que conferisse se os gráficos formados estavam de acordo com o esperado para cada atividade. Alguns grupos apresentaram dificuldade ao usar a opção parâmetros do software, mas após auxílio da professora ou de colegas de outros grupos, o problema era facilmente resolvido. Expressões como “*que massa*” ou “*olha só esses gráficos, que louco*” eram constantemente ouvidas, durante a criação dos gráficos pelo software.

A atividade final do roteiro pedia que os estudantes deixassem sua opinião sobre a atividade. Alguns grupos não responderam e, entre os que responderam, menos de 5% não gostaram de realizar, a exemplo do grupo GE6 que escreveu “*não achamos a aula muito interessante, no começo estava difícil, mas aos poucos fomos aprendendo e nos ajudou a compreender os elementos da onda*”. Para justificar o fato de terem gostado de realizar a atividade, os demais grupos apontaram razões variadas, como no caso do grupo G12F que aponta a motivação como justificativa escrevendo “*Além de ser bem motivadora, a atividade ajudou muito a compreender a matéria.*” O grupo G13G considera que “*Foi fácil e divertido, quando apagamos algum parâmetro percebemos qual a função dele na onda*”(sic) e para o grupo G9G “*A atividade foi de grande compreensão da matéria. Deveria ser realizada mais vezes! Adoramos e achamos fácil*” (sic).

Cerca de 40% dos grupos considerou que a realização das atividades no software foi difícil, como no caso dos grupos G2D e G10E que escreveram “*Deu pra perceber a onda*

*claramente. A dificuldade foi só em mexer no software” e “A parte complicada é realizar os ajustes necessário em cada exercício. Mas foi muito prático para a percepção da estrutura da onda. Muito obrigada professora pela experiência”* (sic), respectivamente. Outros 40% dos grupos admitiram que a dificuldade em lidar com o software foi temporária, como no caso do grupo G4B: *“Antes de entender o programa havia dificuldade, mas depois deslanchou”* e dos grupos G3C e G3B, que admitiram sua falta de atenção como motivo da dificuldade inicial ao escrever *“A atividade em si foi fácil a partir do momento que percebemos que continha instruções”* e *“A atividade estava fácil, porém nossa falta de atenção dificultou a resolução das questões, e o exercício foi fundamental para entendermos mais sobre a onda,”* respectivamente.

Mais de 90% dos grupos atestaram a capacidade da atividade em auxiliar a elucidação dos elementos da onda como, por exemplo, o grupo G7D, afirmando: *“Foi difícil de fazer mas ajudou a entender a matéria.”* De forma semelhante, o grupo G1E apontou que *“A atividade foi fácil, pois foi o programa quem fez os gráficos. Ajudou a compreender os elementos de uma onda pois tivemos que compreendê-los para fazer os ajustes no gráfico”* (sic). Entre os menos de 10%, estava o grupo G6B que escreveu *“O programa é bom, mas ainda não foi suficiente para total compreensão”*, sugerindo que, mesmo não tendo compreendido totalmente os elementos da onda através da atividade, esta teria contribuído em algum grau para melhorar sua compreensão.

Na aula seguinte, a professora abordou o tema interferência a partir da exibição do vídeo “Interferência na cuba de ondas”, disponível no endereço <https://www.youtube.com/watch?v=ORgFE-QQM2w>. A professora considerou, então, que a imagem observada na interferência era a onda resultante da superposição das ondas se propagando ao mesmo tempo, numa mesma região do espaço. Para elucidar essa superposição, diferenciar a interferência destrutiva da construtiva e evidenciar a condição de que após a superposição cada onda segue sua propagação com suas propriedades inalteradas, a professora usou de imagens e uma animação. As imagens estão indicadas nos slides 4, 5, 7, 8 e 9 da Figura 49 do Apêndice e podem ser encontradas nos endereços <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAfmXIAL/interferencia-difracao>, <http://fisicaevestibular.com.br/ondas4.htm> e <http://ondas.galeon.com/enlaces2683930.html>.

A postura da professora de insistir para que os alunos participassem da aula por meio de indagações, pareceu atingir seu objetivo, pois a maior parte dos alunos fez questão de

responder evidenciando suas dificuldades e entendimentos. O aluno C30, por exemplo, disse “já entendi, construtiva quando as barrigas estão pro mesmo lado e destrutiva quando elas são contrárias” e a aluna C1 completou “Isso! E se forem pro mesmo lado, a gente soma as amplitudes, se for contrário a gente diminui” e, ao invés de concordar a professora, perguntou à classe se as afirmações dos colegas estavam corretas. A aluna C8 respondeu “está certo sim, só parece que não sabe os nomes, crista e vale”. A professora entrevistou novamente, perguntando como seria possível dizer a condição usando os nomes corretos e a aluna concluiu “a interferência é construtiva quando se encontram crista com crista ou vale com vale, e destrutiva se for crista com vale.”. Fazendo referência à atividade da aula anterior com o uso do software, a professora considerou que havia sido dado um nome para essa característica da onda que indica qual é a posição da onda em cada ponto, e perguntou qual era. Após algumas tentativas, o aluno C27 concluiu que era a fase. A professora replicou, então, questionando como ficaria caso não se encontrassem exatamente a crista com o vale, mas se fossem pontos intermediários, e o estudante C12 arriscou: “nem tenho noção do nome que tem isso, mas imagino que seria só somar ou diminuir normalmente as alturas”. A professora destacou que esse nome nem seria importante pois se tratariam de interferências parciais, que não costumam aparecer em problemas e exercícios destinados ao ensino médio, e pediu que ele explicasse melhor a parte do somar ou diminuir normalmente as alturas, ao que ele respondeu: “a gente vai somar se os pontos forem pro mesmo lado e diminuir caso contrário”. Dessa vez, a professora concordou, mas chamando a atenção para o fato de que esse lado poderia ser considerado a intensidade positiva ou negativa observada nos gráficos da atividade com o software *Modellus*.

Foi utilizada novamente, neste momento, a simulação da onda na corda, para facilitar a compreensão dos alunos, sendo gerado um pulso que reflete na extremidade fixa da corda e discutida sua inversão de fase ou não, como na Figura 50 do Apêndice. A seguir, foi criado outro pulso, como mostra a Figura 51 do Apêndice, para que fosse observada sua interferência com o primeiro. Da mesma forma, os passos foram refeitos com a extremidade da corda livre, levando às imagens mostradas nas Figuras 52 e 53 do Apêndice. Durante a observação das interferências, foi comum que estudantes pedissem à professora para ir pausando a simulação, a fim de visualizarem melhor o momento da sobreposição e a continuidade de cada pulso após a mesma. Em muitas turmas, este momento se transformou num desafio de quem conseguiria pausar a simulação no momento certo e, com a descontração, a professora conseguiu envolver a maior parte dos alunos na atividade, participação que se manteve nas demais simulações.

A simulação interferência de ondas foi utilizada com duas fontes de água, no caso da primeira opção do aplicativo e modificando a distância entre as fontes e a frequência das ondas criadas. Em cada situação, a professora pedia aos alunos que observassem a nova configuração das franjas de interferência e que identificassem as regiões de interferência construtiva e destrutiva. O aluno E4 pediu à professora que colocasse cada uma das fontes com uma frequência diferente, pois estava curioso em relação à figura que seria formada. A professora concordou que deveria ser uma figura interessante, mas disse que essa era uma limitação importante da simulação. Análise semelhante foi realizada com a opção de ondas luminosas. Para os alunos, o diferencial nesta última opção é a possibilidade de exibir como ficaria a projeção da luz em um anteparo.

Para explorar a interferência de ondas sonoras, a professora optou por mudar de simulação e usou “Ondas Sonoras”, mostrada na Figura 56 do Apêndice e disponível em [http://phet.colorado.edu/pt\\_BR/simulation/sound](http://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/sound), e esclareceu aos alunos que seria mais interessante que a opção som da simulação anterior. Na página inicial da simulação, a professora mostrou aos alunos que a opção de ligar o áudio permitiria a percepção das alterações da amplitude e que, nesta primeira aba, não faria diferença a posição onde o ouvinte seria colocado. Já na aba “duas fontes”, como mostra a Figura 57 do Apêndice, a posição do ouvinte influenciaria na percepção do áudio, já que o ouvinte poderia ser colocado em posição de interferência construtiva, destrutiva ou parcial. A postura dos alunos diante das simulações permite dizer que a atividade os manteve focados, uma vez que durante a simulação do som, o silêncio dos estudantes na sala era absoluto e os mesmos ainda manifestavam irritação se algum ruído externo à sala atrapalhasse sua percepção.

Para finalizar a aula, a professora projetou a imagem da Figura 58 do Apêndice no quadro, fazendo considerações sobre como determinar se, num dado ponto, duas ondas oriundas de fontes distintas sofreriam interferência construtiva ou destrutiva. A professora fazia representações de ondas, sobre a projeção, em cada caminho, e considerava que a quantidade de comprimentos de onda que coubessem na diferença de caminho é que determinaria o tipo de interferência. Muitos alunos se davam por satisfeitos com as representações das ondas sobre a linha e sua análise geral, considerando múltiplos pares de meio comprimento de onda para interferências construtivas e ímpares para destrutivas, no caso de ondas emitidas em fase. Exemplos com dados numéricos se faziam necessários em cada turma, pois sempre havia alguém com dificuldade de compreender na ausência dos mesmos.

As aulas seguintes foram destinadas à execução do segundo roteiro de atividades para o software *Modellus*. O roteiro é apresentado na Figura 59 do Apêndice. Muitos grupos chamavam a professora para se certificarem que estavam criando os gráficos corretamente, ao se depararem com o resultado mostrado na Figura 60 do Apêndice. Outra dúvida comum era “*onde muda a amplitude na equação do modelo?*”, como foi o caso do aluno F12, ao que a professora respondeu sugerindo que observassem a Atividade 1 do roteiro, cuja função era recordar o roteiro anterior e onde cada parâmetro era modificado na equação. Da mesma forma que na segunda atividade, na terceira, as dúvidas foram basicamente sobre o uso do software. A quarta atividade do roteiro discorria sobre interferência entre ondas com frequências distintas e pedia que os grupos representassem o formato da onda resultante, após sua criação no software. Apenas 6% dos grupos não desenharam a representação pedida e as imagens da Figura 15, com os desenhos dos grupos (A) G4C e (B) G1B, representam o desenho dos demais, uma vez que todos ficaram bem semelhantes.

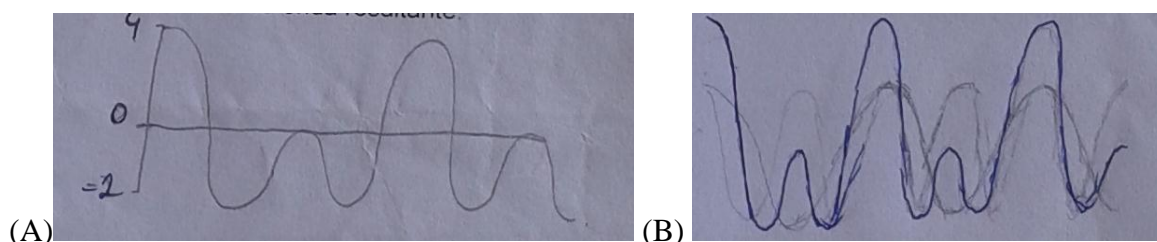


Figura 15 - Representações da onda resultante da interferência de ondas com frequências diferentes dos grupos (A) G4C e (B) G1B.

O fenômeno batimento foi abordado na quinta atividade do roteiro e, desta vez, o dobro de grupos não desenharam a representação pedida. Cerca de 5% dos grupos desenharam gráficos que não apresentavam características comuns às do gráfico criado pelo software, como o caso do grupo G8A, cuja representação está indicada na Figura 16.

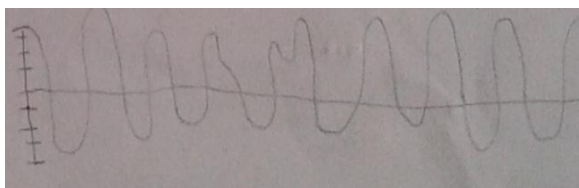


Figura 16 - Gráfico desenhado pelo grupo G8A para o fenômeno batimento.

Os demais grupos fizeram representações que mantinham ao menos uma característica do gráfico apresentado pelo software, como no caso do grupo G3A, mostrado na Figura 17 (A), que não teve suas linhas bem traçadas mas que manteve o aspecto geral, e do grupo G5H, mostrado na Figura 17 (B), que optou por desenhar apenas uma parte do gráfico para que as linhas ficassem mais bem definidas.

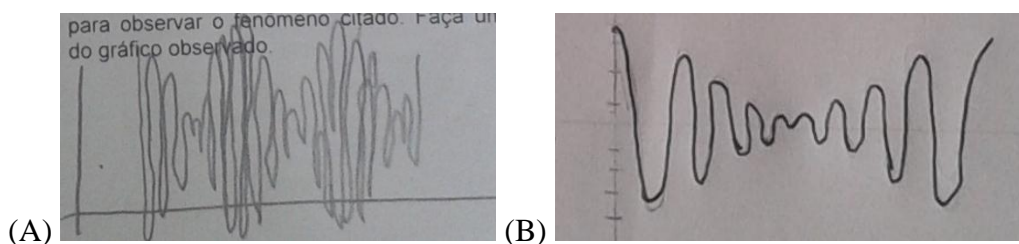


Figura 17 - Gráficos do batimento desenhados pelos grupos (A) G3A e (B) G5H.

Alguns grupos não ficaram satisfeitos em manter apenas uma característica do gráfico e se empenharam um pouco mais, desenhando gráficos com perfil bem parecido ao daquele gerado pelo programa, como nos casos dos grupos G1G e G7H, mostrados na Figura 18.

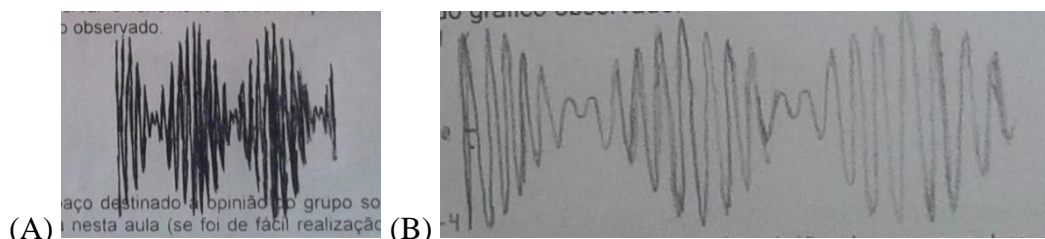


Figura 18 - Gráficos do batimento dos grupos (A) G1G e (B) G7H.

A respeito da opinião dos estudantes sobre esta atividade, nenhum grupo afirmou não ter gostado da mesma. Entre os motivos de gostarem da atividade, os grupos apresentaram opiniões como a dos grupos G2B e G1H que escreveram “*gostamos da atividade, sair um pouco da rotina é interessante e produtivo.*” e “*quando usamos o computador a aula fica mais dinâmica e aprendemos melhor a matéria.*”, respectivamente. A possibilidade de maior interação também é apontada como vantagem, como nos casos dos grupos G1B e G2D que escreveram, respectivamente “*muito bom, por que faz a gente entender melhor a matéria e interagir também*” e “*foi bom, saímos da aula teórica e interagimos mais entre nós. Muito boa a aula.*”

Em relação à dificuldade encontrada na realização da atividade, as opiniões foram bem distribuídas entre os que consideraram fácil, os que acharam difícil e aqueles que já tiveram menos problemas nesta do que na atividade anterior com o software. Entre os grupos que se enquadram no primeiro caso, está o grupo G10G, ao escrever: *“na nossa opinião foi fácil e aulas desse tipo sai do básico e ajuda a compreender a matéria com mais facilidade”* (sic). Entre os motivos para considerarem a atividade difícil, o grupo G5F considerou: *“achamos o trabalho difícil. Os comandos do programa nos confundiram um pouco. Mas ainda assim achamos melhor que as aulas comuns.”* Já o grupo G5D atribuiu a dificuldade na atividade ao comportamento da turma no momento da realização quando escreveu *“foi mais ou menos, a conversa atrapalhou nosso trabalho”*. O grupo G4G, ao mencionar *“não foi fácil, mas foi divertido e ajudou a entender a interferência”*, fez questão de explicitar a satisfação com a realização da atividade, apesar das dificuldades. Entre os grupos que tiveram mais facilidade nesta atividade estão o G5A, o que foi aferido da afirmação: *“foi mais fácil que a primeira atividade, com a prática a gente entender e fica mais fácil”* (sic) e o G6E, para o qual a atividade *“foi mais fácil que a outra atividade e contribuiu para a visualização quando as fases são iguais ou opostas”*. Entre os grupos que se posicionaram sobre a capacidade da atividade em auxiliar na compreensão do conteúdo, não houve nenhum que afirmasse não ter percebido melhora, como indicam as opiniões citadas anteriormente.

A aula seguinte foi conduzida principalmente pelos estudantes D24 e D39, apresentando para a turma as atividades experimentais que haviam preparado. Eles usaram, inicialmente, a mola maluca, brinquedo mostrado na Figura 66 do Apêndice. Com ela, mostraram ondas transversais e longitudinais, consideraram que a aquela onda era mecânica e unidimensional, fazendo as devidas explicações, praticamente sem intervenção da professora.

A seguir os alunos passaram a utilizar a “máquina de ondas”, produzida pelos mesmos e mostrada na Figura 67 do Apêndice. Retomaram as considerações sobre as classificações das ondas obtidas com o material. Eles mostraram que a determinação da frequência da onda é dada pela sua fonte que, no caso da máquina, era a frequência com que um deles batia o dedo em um dos palitos. Destacaram que, quanto maior fosse a frequência da onda gerada, menor ficaria seu comprimento de onda. Chamaram a atenção para a reflexão da onda ao chegar à extremidade da máquina.

O processo foi feito com a mola helicoidal longa, fornecida pela professora, que pode ser observada na Figura 70 do apêndice. Neste caso, além das observações feitas na

máquina de ondas, foi possível observar a interferência entre dois pulsos criados simultaneamente e, ainda, a onda estacionária, resultado da interferência entre a onda criada e aquelas refletidas nas extremidades da mola. Esta aula cativou muito a atenção dos estudantes que chegavam a se queixar quando o sinal que marca o fim do horário interrompia a observação.

Para iniciar o tratamento da difração, a professora apresentou a imagem mostrada na Figura 72(A) do Apêndice, apresentando considerações a respeito da forma da sombra geométrica da fenda no anteparo. Quando ela perguntou como ficaria a forma da sombra, caso a espessura da fenda fosse reduzida drasticamente, todos os alunos que responderam concordaram que a sombra manteria o mesmo formato, mudando apenas o tamanho. Quando a professora mostrou a imagem da Figura 72(B) do Apêndice, afirmando que quando a fenda fosse suficientemente estreita a projeção teria aquele aspecto, a aluna E1 exclamou “*Mentira! Isso não existe!*” Diante da fala da colega, toda a turma mostrou reação de espanto e olhou pra professora aguardando sua resposta. A professora então perguntou se se lembravam de quando falou do fenômeno de difração, que foi explicado por Fresnel mostrando que a luz tem comportamento ondulatório e que, naquela ocasião, mencionou que nesse fenômeno aparece luz na região da sombra. A aluna disse se lembrar dos nomes do fenômeno e do cientista, mas não do que se tratava o fenômeno. A professora considerou, então, que esse fenômeno seria o espalhamento da onda ao atingir um obstáculo ou fenda, e não aconteceria em qualquer circunstância, sendo necessário que o obstáculo ou fenda tivesse o tamanho da mesma ordem de grandeza do comprimento da onda o que, para a luz, dificultaria sua percepção, pois, a luz visível é formada por mais de um comprimento de onda e seus valores são muito pequenos – da ordem de 500 nm. Ela considera ainda que, apesar da dificuldade de observação do fenômeno para as ondas luminosas, ele é facilmente percebido em outros casos, como o som, as ondas de rádio na frequência AM e ondas na água, e apresenta uma imagem para cada caso, imagens constantes na Figura 73 do Apêndice.

Para ilustrar melhor o fenômeno em ondas na água, a professora exibiu o vídeo de difração na cuba de ondas, disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=enQ6EeP9frk> e representado pela Figura 75 do Apêndice. Foram explorados os recursos de difração da simulação Interferência de ondas. No caso de ondas na água, mostrado na Figura 76 do Apêndice, são usadas barreiras com uma e com duas fendas, além da variação da frequência das ondas. De forma semelhante, foram explorados os recursos do simulador para difração da luz, como mostra a Figura 77 do Apêndice. Ao modificar a frequência da onda luminosa, o

aluno E14 observou que, no simulador, demoraria muito para que a luz chegue ao anteparo, o que não refletiria a realidade. A professora elogiou a observação do aluno e chamou a atenção para o fato de que as simulações têm limites, como este por exemplo.

Percebendo que a aluna E1 estava acompanhando, mas não se mostrava satisfeita por não conseguir observar a difração da luz, a professora se dirigiu a ela, perguntando se ela saberia em que situação seria possível tal observação. A aluna, então, repete as dificuldades citadas anteriormente *“o objeto tem que ser muito pequeno e a onda só ter um comprimento de onda”* e a professora insistiu em recolocar a pergunta de como seria possível um objeto tão pequeno, qual seria este tamanho e, como conseguir uma luz com apenas um comprimento de onda, caso fosse possível. A aluna argumentou, novamente, que não seria possível observar por que os materiais necessários não estão disponíveis. A professora perguntou, então, qual tipo de objeto ela imaginou sendo pequeno o suficiente para isso. Na ausência de resposta da aluna, a professora pediu a opinião dos demais. Um aluno propôs a espessura de uma moeda, outro sugeriu a ponta da caneta esferográfica, e alegando que ainda estavam grandes as dimensões, a professora sugeriu a espessura de um fio de cabelo. A turma concordou que o fio seria fino o suficiente, mas aponta que ainda faltaria a fonte de luz. Na tentativa de fazer com que os alunos chegassem por si à conclusão, ela perguntou o que aconteceria com a luz no simulador quando mudavam o comprimento de onda. Rapidamente, uma aluna respondeu que mudava a cor da luz. E outra concluiu que, se a luz fosse de uma cor só e não branca, daria certo. A professora valorizou a observação da estudante e salientou que não bastaria uma lâmpada colorida comum, pois a faixa de comprimentos de onda ainda seria grande e que a fonte de luz mais próxima da monocromática conhecida seria o laser. Aluna E1 perguntou, então, *“Ah! Então daria pra fazer com um laser no fio de cabelo?”* e a professora respondeu *“daria não, dará! Faremos agora!”* enquanto pegou o apontador de laser verde do material e puxou um fio do próprio cabelo.

Ao perceber a figura de difração que o laser formou ao atingir a parede da sala após passar pelo fio de cabelo, como na Figura 78 do Apêndice, a aluna exclamou *“a cada dia eu concordo mais que Física é vida, professora! Olha só que massa!”* (sic). A professora destacou, então, que dependendo do objeto ou fenda, a figura de difração será diferente; usando o laser e um CD e também na película arranhada do seu telefone celular. Voltando a apresentação de slides, a professora abordou o princípio de Huygens para explicar como o fenômeno acontece. As imagens da Figura 79 do Apêndice foram utilizadas na apresentação e discussão.

A Figura 80 do Apêndice foi projetada, para retomar a discussão sobre a diferença de caminho percorrido pela luz, realizada na aula sobre interferência e a Figura 81 do Apêndice foi usada para a observação do gráfico de intensidade da luz no anteparo após a difração. Assim que a professora disse aos alunos que na aula seguinte fariam a análise deste gráfico, usando o software *Modellus* o aluno C12 se queixou dizendo “*eu sabia que ia piorar, aqueles gráficos estavam fáceis demais.*” E a professora sugeriu que ele aguardasse a realização da atividade antes de tirar conclusões.

A aula foi finalizada com a observação da Figura 82 do Apêndice, representando o experimento de Young. A imagem ajudou a esclarecer aos alunos, os procedimentos adotados por Thomas Young para conseguir verificar que a difração também ocorreria para luz, uma vez que na época ainda não havia sido inventado o laser.

A última atividade com o software *Modellus*, realizada na aula seguinte, foi direcionada pelo roteiro apresentado na Figura 83 do Apêndice. O primeiro item do roteiro pedia que os grupos explicassem o fenômeno de difração. A maior parte dos grupos usou termos usados pela professora, escrevendo que “*a difração acontece por que a luz é espalhada pelo obstáculo*”, como no caso do grupo G2G. No entanto, alguns grupos tentaram formular a explicação com suas próprias palavras como o grupo G5C, “*o laser bate no fio de cabelo que funciona como um retransmissor do laser. Isso só acontece porque o comprimento de onda do laser é da mesma ordem de grandeza da espessura do fio de cabelo*” (sic) e o grupo G7G, para o qual a “*difração é um fenômeno associado a desvios da propagação da luz em relação ao previsto pela óptica geométrica*”.

O segundo item foi efetuado sem problemas e, no terceiro, a professora foi chamada várias vezes para verificar se o gráfico ficou como esperado. O gráfico gerado pelo programa é mostrado pela Figura 84 do Apêndice. Todos os grupos conseguiram fazer ao menos um esboço do gráfico, como no caso do grupo G2F, que desenhou o gráfico mostrado na Figura 19 (A). No entanto, alguns grupos, como G6A, ainda incluíram valores para os pontos do gráfico como mostra a Figura 19(B).

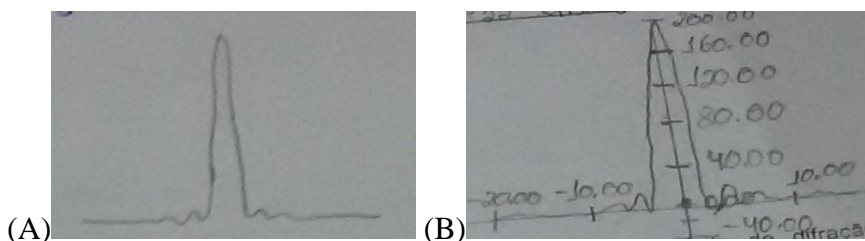


Figura 19 - Gráficos da intensidade da luz que atinge um anteparo após sofrer difração feitos pelos grupos (A) G2F e (B) G6A.

Nos itens seguintes, o problema dos alunos foi visualizar os valores no gráfico, mesmo com a orientação escrita no roteiro, foi preciso que a professora mostrasse para vários grupos como alterar o zoom do gráfico.

Os estudantes se expressaram mais nesta atividade, a respeito das dificuldades encontradas na criação do gráfico ou em sua análise, como no caso do grupo G3E que escreveu *“Não foi difícil fazer, mas ainda ficamos com dúvidas no gráfico”* e o grupo G2H, que concluiu *“o gráfico dessa atividade foi bem mais complicado.”* Já o grupo G2B, considerou que as dificuldades foram com o software quando registraram *“Ajudou na compreensão do conteúdo apesar das dificuldades com o programa.”* Já o grupo G5B não especifica a dificuldade ao afirmar *“essas atividades são muito complicadas, mas nós te amamos chuchu”* (sic).

Vários grupos consideraram que o trabalho em grupo possibilitou a realização da atividade, como os G1F e G7G, citando *“foi fácil porque todos do grupo colaboraram”* e *“no começo foi difícil, mas todos do grupo ajudaram e ficou fácil”*, respectivamente.

Na afirmação *“ficaram mais claras pra gente essas peculiaridades da difração”*, o grupo G6B manifesta que a atividade auxilia na compreensão do fenômeno, bem como o grupo G3A, ao apontar que *“Foi fácil realizar a atividade e ajudou muito na compreensão da matéria. Pode repetir várias vezes.”*

Da mesma forma que na atividade anterior com o software, nenhum grupo disse não gostar da atividade. Como os grupos G7H e G8E, que escreveram respectivamente *“Foi uma experiência boa, muito criativa. Adoramos!”* e *“nós gostamos da atividade e gostaríamos de fazê-la mais vezes”* vários outros afirmaram gostar de realizar a atividade sem especificar qual aspecto da mesma teria influenciado suas opiniões. O grupo G6C se mostrou surpreso ao

escrever “*por incrível que pareça foi bom e fácil*”. Tal grupo tinha entre seus componentes alguns dos alunos que se queixavam de realizar atividades com gráficos.

Na penúltima aula da sequência, a professora retomou a pergunta do questionário preliminar que fala da projeção 3D do cinema e em alguns aparelhos de uso residencial. A aula foi iniciada com a leitura ‘ponto a ponto’ um de um texto elaborado a partir dos textos disponíveis em <http://mundoestranho.abril> e <http://www.vocesabia.net/> a respeito do funcionamento dos óculos usados nos cinemas. Esse último material esclarecia que existe mais de uma possibilidade tecnológica para criação da imagem tridimensional. Nosso recorte dava destaque à tecnologia mais comum nos cinemas hoje em dia, que utiliza a polarização por meio dos óculos e, ainda, dispunha de uma figura explicativa bastante simples e didática, mostrada na Figura 86 do Apêndice.

A metodologia de leitura referida consiste em cada aluno ler em voz alta uma oração do texto, parando no ponto seguinte para que o próximo aluno siga com a leitura. Em algumas turmas, foram poucos os alunos dispostos a ler, então o método de leitura foi adaptado para ‘parágrafo a parágrafo’, de forma que cada aluno leu um parágrafo do texto deixando o próximo para o aluno seguinte.

No slide seguinte foi apresentado, juntamente com um conceito da polarização e a condição para que aconteça, um link para uma animação sobre o fenômeno. A animação se apresenta como na Figura 87 do Apêndice e pode ser encontrada em <https://drive.google.com/file/d/0B-KWZ4pgvMISVHFZZ1VzaXExQVk/view?usp=sharing>.

A seguir a professora apresentou as imagens, mostradas na Figura 88 do Apêndice, sobre o fenômeno, para auxiliar na elucidação do mesmo. As imagens estão disponíveis em (A) <http://astro.if.ufrgs.br/telesco/node7.htm> e (B) <http://educacao.globo.com/fisica/assunto/ondas-e-luz/fenomenos-ondulatorios.html>.

Um par de óculos polarizador usado em cinema 3D foi mostrado aos alunos, os quais foram orientados a observar a luz emitida pela tela dos seus celulares, através das lentes dos óculos, girando a lente durante a observação. A percepção de que as cores da luz emitida pela tela do celular modificam-se enquanto a lente é girada na sua frente, como mostra a Figura 89 do Apêndice, possibilitou a discussão sobre o fato de cada lente ter uma polarização diferente e que é a combinação das imagens obtidas com as duas que cria o efeito de imagem tridimensional percebido no cinema.

Considerando as polarizações distintas nas lentes dos óculos, foi possível abordar também que, com duas lentes de polarizações contrárias, seria possível anular a luz emitida por alguma fonte, como mostra a Figura 90 do Apêndice. Essa neutralização da luz foi representada com a animação representada na Figura 91 do Apêndice.

Em relação à anulação da luz usando apenas um polarizador, o aluno F12, que estava com os óculos de cinema em mãos, pediu para testar o efeito que teria colocá-los diante da luz do projetor. Com esse conectado ao computador, as cores da projeção ficavam alteradas de forma semelhante àquela percebida com o celular, mas se a conexão entre o projetor e o computador fosse interrompida, a luz era neutralizada para posições adequadas das lentes.

A aula foi encerrada com a representação do polarizador através de uma peneira de barbante. Nesta peneira, os barbantes estavam colocados de modo a formar uma malha paralela, como mostra a Figura 93 do Apêndice. Ao soltar palitos de fósforo sobre essa peneira, os alunos concluíram que só a atravessam aqueles palitos que estiverem alinhados com a malha da mesma.

A décima sexta aula foi destinada à elucidação da geração do holograma, o tema da última pergunta do questionário preliminar. O assunto emergiu de uma contextualização histórica que trazia informações como a invenção da técnica do holograma em 1948, por Denis Gabor, na Hungria. A invenção do laser por Theodore Maimann só aconteceu em 1960, o que possibilitou que Emmett Leith e Juris Upatnieks produzissem o primeiro laser de uso prático e criassem os primeiros hologramas em três dimensões. A tecnologia do holograma deu a Gabor o Nobel de Física em 1971.

Foram apresentadas algumas imagens em que os hologramas são usados como garantia de autenticidade de produtos, como no caso dos cartões de crédito e conteúdos multimídia, apresentados na Figura 95 do Apêndice. Esta é a aplicação mais comum dos hologramas atualmente e, mesmo quando os alunos afirmam que estes casos não apresentam “*nada muito interessante*”, como a aluna H37 disse, eles concordam que é uma forma eficiente para evitar fraudes, pois “*não deve ser muito fácil copiar esse efeito perfeitamente*”, segundo o aluno D2.

Também foi apresentada a Figura 96 do Apêndice, que mostra o holograma de um objeto tridimensional e foi extraída do trabalho de José Manuel Rebordão, pesquisador do Laboratório Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial (LNETI) de Portugal. Vários

alunos insistiam em saber como teriam sido feitos os shows que mostram artistas que já faleceram ou que nem existem realmente de forma supostamente holográfica, como os casos do rapper Tupac Shakur, morto em 1996, e que apareceu em show com Snoop Dog em um festival em 2012, mostrado na Figura 101 do Apêndice, e da *popstar* japonesa criada virtualmente, Hatsune Miku, mostrada na Figura 102 do mesmo, que arrasta multidões para seus shows em várias cidades do Japão.

A professora preferiu esclarecer como se dá a criação de um holograma para que os próprios alunos julgassem. Partindo da projeção da Figura 97 do Apêndice que mostra, de modo simplificado, que o laser é dividido em dois feixes que seguem caminhos diferentes, um deles passando pelo objeto enquanto o outro vai diretamente para a película fotossensível, a professora citou que as franjas de interferência entre os dois feixes são gravadas na película. Visualizando essa imagem, foi retomada a discussão sobre o fato de a diferença entre os caminhos percorridos pelos feixes de luz determinar se em cada ponto haverá interferência construtiva ou destrutiva. Foi necessário considerar exemplos numéricos para melhorar a elucidação para vários alunos nesta análise. Usando a Figura 98 do Apêndice, a professora considerou então que o laser, após sua incidência sobre o registro, fica sujeito à difração nas franjas registradas, formando uma imagem tridimensional do objeto.

Alguns alunos disseram que a parte da difração havia ficado clara, mas a parte da interferência ainda não. Então, a professora usou a animação disponível em <http://www.tecmundo.com.br/holografia/4343-holografia-o-3d-ja-esta-com-os-dias-contados-.htm>, na tentativa de melhorar a compreensão dos alunos e refez a discussão da diferença de caminho. Neste momento, a aluna E9 exclamou *“fico imaginando o QI daquele cara que inventou essa teoria, e ele fez isso quando o laser nem existia, devia ser um gênio!”* A professora argumentou, então, que não é assim que as coisas acontecem no mundo da ciência e que ter QI alto não é garantia de sucesso no campo da pesquisa, este trabalho exige muito esforço e dedicação. A aluna tentou replicar, perguntando de onde ele tiraria ideia para pensar em uma teoria que nem teria como ser aplicada por muito tempo, ao que a professora respondeu que, certamente, o cientista desenvolvia trabalhos que exigiram muito estudo sobre a luz e seu comportamento ondulatório e que, talvez, até seu problema de pesquisa o tivesse levado por esse caminho. Não satisfeita, a aluna disse *“quer dizer que até eu poderia ser cientista?”* e a professora respondeu que sim e que a expressão ‘até eu’ não fazia sentido, uma vez que ninguém nasce cientista, mas se torna como resultado de trabalho e dedicação.

O aluno C3 perguntou à professora qual o motivo de não fazerem um holograma experimentalmente na sala de aula. A professora mostrou a Figura 100 do Apêndice, a qual apresenta a fotografia de uma montagem utilizada em laboratórios de pesquisas como no Laboratório de Óptica da Unicamp, e fala que o processo demanda equipamentos, como espelhos e lentes, além de uma bancada fixa, inviabilizando sua execução na escola.

A professora, então, os questionou sobre os shows, se seriam ou não hologramas. O aluno B9 afirmou que sempre achou que se tratasse de holograma, mas que já não tinha mais certeza, naquele momento. A professora lembrou aos alunos que o holograma se caracteriza por representar o objeto completamente, de forma que o observador teria a sensação da presença do objeto de qualquer posição que o observasse. Outro aluno relatou que já havia visto a informação que em show com projeção de artista, haveriam alguns lugares privilegiados na plateia e, outros onde seria ruim a experiência de visualização. O aluno B9 contou, então, que sabia que o show do rapper foi feito projetando uma imagem em uma tela transparente inclinada a 45°, conforme mostra a Figura 103 do Apêndice.

A professora perguntou ao aluno B9 se, no caso do show de Tupac, as laterais do palco seriam bons lugares para assistir a apresentação, ou se o rapper que está no palco teria a mesma percepção de alguém posicionado em frente ao palco. O aluno respondeu negativamente às duas situações e concluiu que o show não foi feito com um holograma verdadeiro. Antes que alguém pudesse falar qualquer coisa, o mesmo aluno disse *“pode não ser um holograma verdadeiro, mas eu gostaria de ter ido ao show mesmo assim.”*

Após a aplicação de toda a sequência, os alunos responderam a um novo questionário. Primeiramente foi perguntado se, ao comparar o que escreveram no questionário preliminar com o que pensam agora, houve mudança no pensamento deles. A Tabela 2 mostra a quantidade de alunos que participaram de alguma parte da sequência, a quantidade de alunos que estiveram presentes do início ao fim e quantos consideram se houve mudança de pensamento em relação às respostas dadas no primeiro questionário.

**Tabela 2** - Quantidade de alunos que participaram das atividades, que responderam ao questionário preliminar e ao final e a quantidade que considera que houve mudança, por turma e total.

<b>Turma</b>	<b>Quantidade de alunos</b>	<b>Participaram no início e no fim</b>	<b>Consideram que houve mudança</b>
<b>A</b>	37	18	16

<b>B</b>	38	29	28
<b>C</b>	38	25	24
<b>D</b>	39	26	25
<b>E</b>	37	29	27
<b>F</b>	41	24	24
<b>G</b>	39	33	33
<b>H</b>	37	23	23
<b>Total</b>	306	207	200

Fonte: própria da autora

Os dados indicados na Tabela 2 corroboram o grande número de alunos por turma e a variação neste número ao longo das atividades devido a remanejamentos, transferências e faltas. Considerando apenas os alunos que responderam ambos os questionários, 97% consideram que seus pensamentos a respeito de fenômenos de conceitos ondulatórios e fenômenos luminosos sofreram modificações com o desenvolvimento da sequência. Perguntamos como as atividades teriam contribuído para a forma atual de pensamento, e foram muitas as respostas como, por exemplo,

*“As atividades contribuíram bastante para o meu aprendizado, passei a conhecer várias coisas sobre as ondas que não conhecia como difração, polarização, interferência etc.” (F24)*

*“Antes eu ao tinha nenhuma ideia sobre esses fenômenos, nunca tinha pensado a respeito da luz. Depois das aulas aprendi coisas que nunca havia imaginado que existiam, gostei muito dessa matéria.” (G33)*

Lembrando que, no primeiro questionário quase todos os alunos responderam que o ente físico que se assemelha a “ôla” era uma onda, mas menos de 1% tentou explicar ou descrever características, observamos que, no questionário final, 40% de todos os alunos que participaram em algum momento das atividades conseguiu escrever um conceito para onda, mesmo que de modo incompleto. Acreditamos que seja possível assumir que foram grandes as modificações na compreensão dos alunos, como a maioria deles declarou acreditar. Se considerarmos apenas os alunos que participaram de toda a sequência, chega a quase 60% a quantidade de questionários nos quais um conceito para onda foi descrito sem incorreções. A maioria dos alunos fez menção à condição de transportar energia sem transporte de matéria, como a estudante B6 para a qual *“onda é uma sucessão de pulsos que transfere energia sem transporte de matéria.”* Outro tipo de resposta comum foi como a da aluna A1, que escreveu

*“são perturbações que se propagam”* ou *“oscilações que transportam energia”*, como escrito pelo aluno G17.

Da mesma forma que o aluno H32, que escreveu que a onda seria *“uma frequência de oscilações no comprimento de ondas”*, outros estudantes utilizaram termos de elementos ou fenômenos no lugar destinado ao conceito, parecendo sugerir, que embora não consigam formalizar o conceito, eles tenham alguma noção do que se trata. Este aluno ainda fez o desenho mostrado na Figura 20 para representar sua explicação.



Figura 20 - Representação da onda na água, feita pelo aluno H32.

O gráfico da Figura 21 mostra a quantidade de alunos, por turma, que conseguiu explicar o que faz uma onda ser considerada mecânica ou eletromagnética. No total, 44% dos alunos caracterizou corretamente a onda quanto a sua natureza, como a aluna C29 que escreveu

*“- onda mecânica: precisa da matéria para se propagar;  
- onda eletromagnética: não precisa de matéria para se propagar e se propagar os pontos não vibram..”*

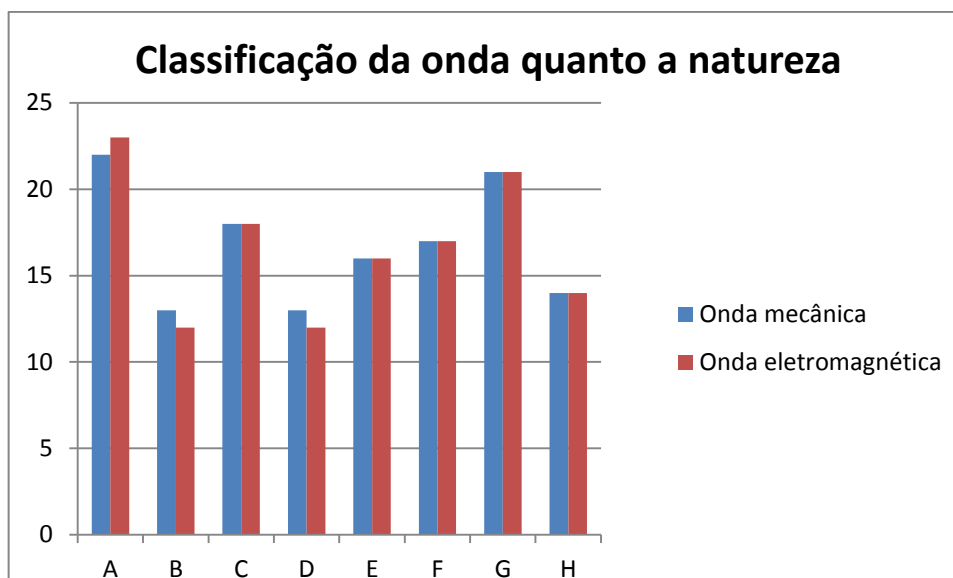


Figura 21 - Gráfico comparativo da quantidade de alunos que soube explicar o que caracteriza uma onda como mecânica ou eletromagnética, por turma.

Poucos foram os casos em que o estudante caracterizou apenas um tipo corretamente, por exemplo, quando o aluno A13 escreveu “*As ondas mecânicas precisa de **onda** para se propagar, ex: som. E as ondas eletromagnéticas já não precisa de matéria para se propagar, ex: luz.*”; acreditamos que respostas redigidas como essas tenham sido fruto de falta de atenção, pois a frase usada para as ondas eletromagnéticas sugere que a matéria tenha sido apontada como necessária para as ondas mecânicas e no lugar dela ele escreveu onda, como grifamos.

Muitos foram os estudantes que escreveram, como a aluna C22, “*as ondas mecânicas precisam de um meio para se propagar e a eletromagnética não precisa.*” Tais casos não foram computados na confecção do gráfico da Figura 21, pois não temos elementos para afirmar que se trata apenas de um esquecimento ou que considerem que a palavra meio já inclui a condição de haver matéria. Se tivéssemos considerado tais casos, os números do gráfico da Figura 21 seriam dobrados.

A respeito dos elementos da onda foram apontados amplitude, comprimento de onda, frequência e período, nas quantidades mostradas na Figura 22. O comprimento de onda foi o elemento mais lembrado pelos alunos, totalizando 54% do total de estudantes que participaram de alguma parte da sequência, seguido pela amplitude, a qual apareceu em 50% dos questionários, a frequência, retratada em 34% dos casos e o período em 10%. Não foram considerados neste cálculo, os questionários em que os alunos apenas citaram os elementos. E

se considerarmos a quantidade de alunos a descrever cada elemento apenas entre os 207 que participaram dos questionários inicial e final, os valores mudam para 80% para o comprimento de onda, 73% para a amplitude, 50% para a frequência e 15% para o período.

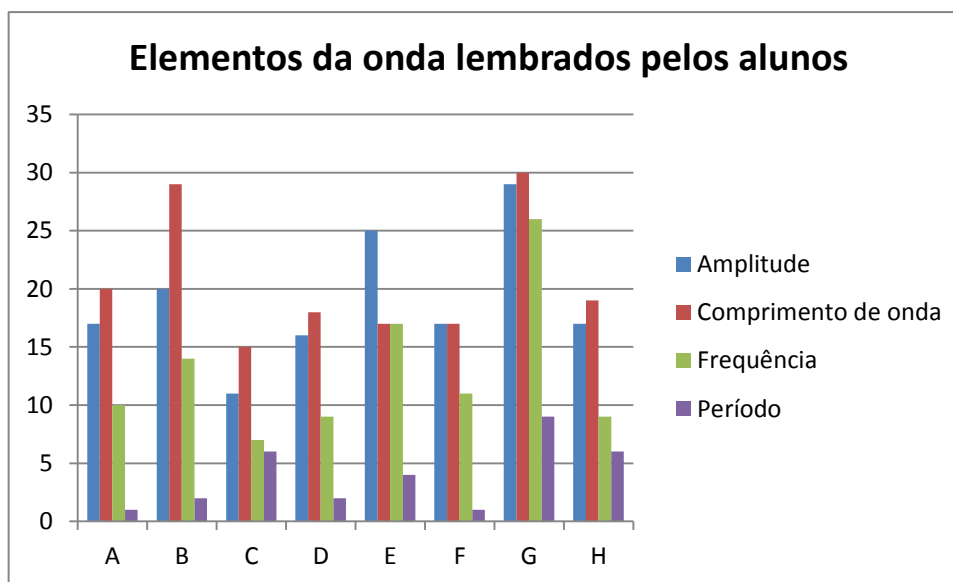


Figura 22 - Quantidade de alunos que descreveram corretamente a amplitude, o comprimento da onda, frequência e período em cada turma.

Muitos alunos optaram por descrever a amplitude e o comprimento de onda através de desenhos, como H34 e C15 cujos desenhos estão apresentados na Figura 23.

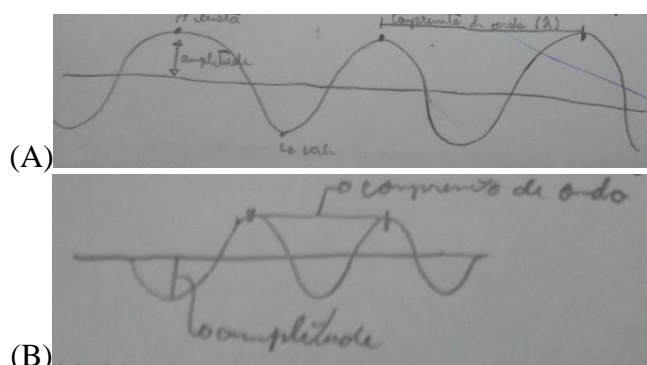


Figura 23 - Representação dos alunos (A) H34 e (B) C15 para a amplitude e o comprimento de uma onda

A frequência foi descrita pela aluna F25 como “*quantidade de oscilação completa por unidade de tempo*” e esta descrição é bem semelhante à encontrada nas atividades da maioria

dos alunos que respondeu. A quantidade de estudantes que abordaram o conceito de período foi significativamente menor que aquela dos que descreveram o que é frequência, talvez pelo fato de que o período não apareceu em muitas situações trabalhadas com os alunos. Entre os que descreveram, o período aparece como *“tempo gasto em uma oscilação completa”*, da aluna F25.

Nas questões que se referiam aos fenômenos ondulatórios, todos os estudantes citaram ao menos um, mas aqui só contamos aqueles questionários em que os fenômenos foram minimamente explicados através de textos ou desenhos. A Figura 24 mostra a quantidade de alunos, por turma, que se lembrou de cada um dos fenômenos elencados, representados por diferentes cores.

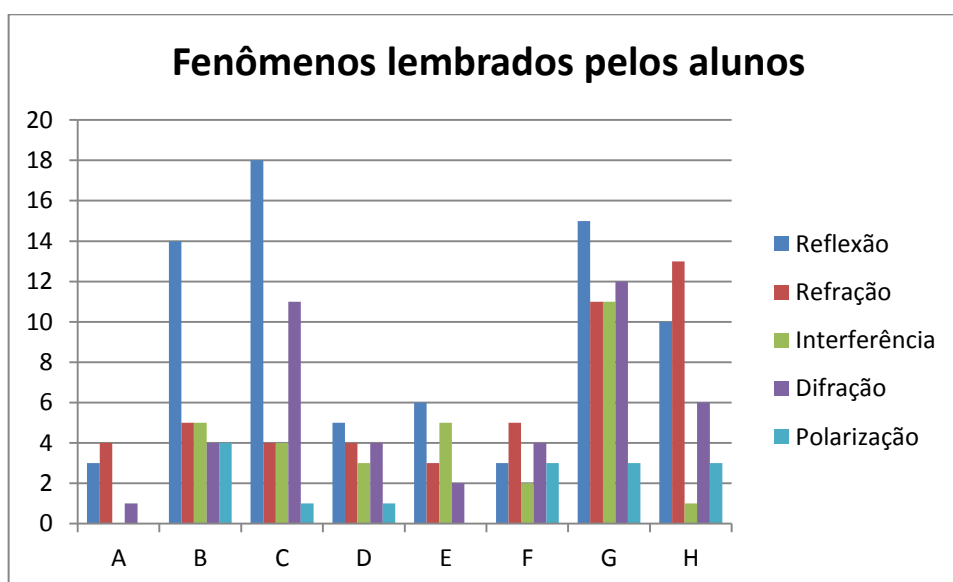


Figura 24 - Quantidade de vezes que cada um dos fenômenos foi lembrado pelos alunos

O fenômeno mais lembrado foi a reflexão, aparecendo nas respostas de 36% dos estudantes, seguido da refração, com 24% de presença nas respostas dos alunos.

Na maior parte das respostas em que esses fenômenos são descritos, aparecem de forma semelhante às do aluno E31 que escreveu *“refração: a onda muda de meio e de velocidade, reflexão: a onda bate e volta ao mesmo meio.”* O fato da reflexão e da refração serem bastante lembradas, mesmo não tendo sido os conceitos centrais em nenhuma das aulas da sequência, nos faz acreditar que foram conceitos importantes para a formação do campo

conceitual pretendido. Alguns alunos optaram por mostrar reflexão e refração através de desenhos, como o aluno H34, cujas representações constam na Figura 25.



Figura 25 - Representações do aluno H34 para a (A) reflexão e a (B) refração.

O fenômeno de interferência foi lembrado por 15% dos alunos participantes e apareceu, principalmente, na forma de desenhos, como mostrado na Figura 26.

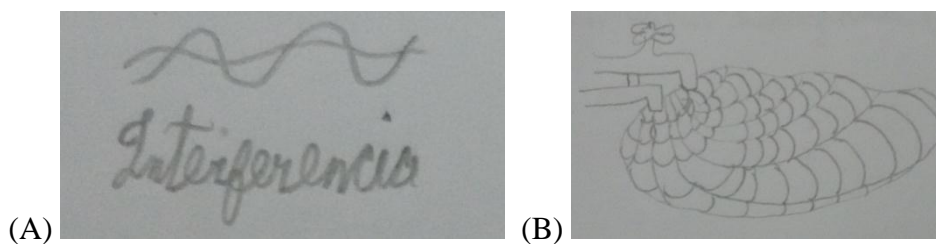


Figura 26 - Desenhos feitos pelos alunos (A) C9 e (B) E7 para representar a interferência.

As quantidades de alunos indicados no gráfico da Figura 24 indicam que 21% dos alunos conseguiram descrever a difração corretamente. A maior parte dos alunos que optou por escrever uma descrição para a difração, o fez de forma semelhante a aluna C5, afirmando que acontece a difração “*quando a onda se espalha ao passar por uma fenda*”. Entre os alunos que optaram pelo desenho, estão os alunos H34 e C9, cujos desenhos são mostrados na Figura 27.

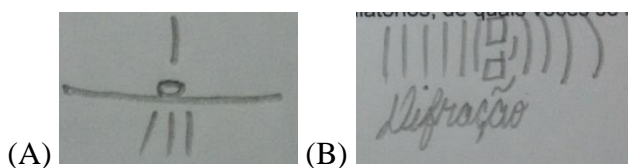


Figura 27 - Desenhos dos alunos (A) H34 e (B) C9 para a difração

Outros 12% dos alunos descreveram a difração da mesma forma que a aluna E21, apontando que “*difração é a capacidade da onda de contornar obstáculos.*” Essa afirmação sugere que os estudantes entendem a difração como “*encurvamento da onda*”, da mesma forma que o aluno F13 ao desenhar a imagem mostrada na Figura 28.



Figura 28 - Desenho do estudante F13 para a difração, mostrada aqui como “*encurvamento da onda*”.

Uma possibilidade para tal entendimento dos alunos é a forma como o livro didático adotado na escola apresenta o conceito “*A difração é um fenômeno ondulatório segundo o qual uma onda pode contornar obstáculos.*” (ARTUSO e WRUBLEWSKY, 2013). Essa percepção é inadequada, e deve ser salientado aos estudantes que as extremidades do obstáculo funcionam como novas fontes de onda, em fase com a onda incidente, se combinando em conformidade com o princípio de Huygens.

A polarização foi lembrada por 7% dos estudantes, os quais a descreveram por meio de textos e desenhos. O aluno C7 escreveu que a polarização é “*a seleção de uma direção de vibração da onda*” enquanto o aluno D5 optou por fazer o desenho da Figura 29.

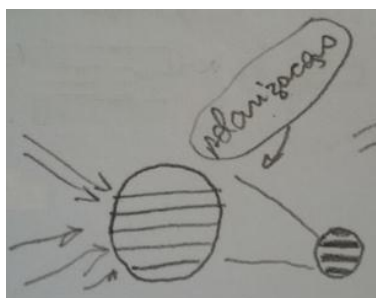


Figura 29 - Desenho do aluno D5 para representar a polarização.

Uma justificativa para a polarização ter sido menos lembrada que os demais fenômenos pode ser o fato de que o tema foi trabalhado apenas em uma aula, fazendo com que os alunos fossem submetidos a poucas situações e dificultando a adaptação de seus esquemas na construção do campo conceitual.

Entre os estudantes participantes, apenas 1% conseguiu descrever o processo de criação e observação do holograma usando texto como a aluna G5 que escreveu:

“O laser se divide em dois feixes que seguem caminhos diferentes e ocorre a interferência deles, a interferência será gravada no filme. Para vermos a imagem a luz sofrerá difração no filme.”

Outros 34% dos alunos conseguiram fazer referência ao processo de criação do registro para formar o holograma, por meio de textos ou desenhos e apenas 11% tentou retratar o processo para a reprodução da imagem, neste caso só através de texto. A distribuição desses alunos nas turmas é apresentada na Tabela 3.

Muitos dos alunos que descreveram o processo de criação do registro do holograma, o fizeram dando ênfase ao fenômeno de interferência, responsável pela gravação das franjas no filme fotossensível, como o aluno D3 ao apontar *“entendi que os lasers sofrem reflexão e interferem para criar o holograma.”* Já a aluna C8 destacou os fenômenos envolvidos quando escreveu *“Entendi como a difração e a interferência estão presentes no processo de criação e reprodução do holograma, mas não sei explicar aqui.”* O aluno C16 escreveu *“a luz passa em várias lentes na direção certa. Uma tem que passar no objeto que vai ser holografado e depois elas se encontram e gravam o holograma do objeto.”*

**Tabela 3** - Alunos que descreveram apenas a criação do registro do holograma, apenas a forma de reprodução da imagem ou atribuiu o fenômeno a algum equipamento especial e altamente tecnológico.

<b>TURMA</b>	<b>Criação do registro</b>	<b>Reprodução da imagem</b>	<b>Efeito de projetor ou jogo de luz especial</b>
<b>A</b>	8	4	6
<b>B</b>	5	4	4
<b>C</b>	8	1	0
<b>D</b>	9	1	3
<b>E</b>	8	0	0
<b>F</b>	10	3	0
<b>G</b>	15	8	2

<b>H</b>	8	3	2
<b>TOTAL</b>	<b>71</b>	<b>24</b>	<b>17</b>

Fonte: própria autora.

Alguns alunos preferiram mostrar a forma de gravar os padrões de interferência do holograma através de desenhos, como a aluna D1 cujo desenho é mostrado na Figura 30.

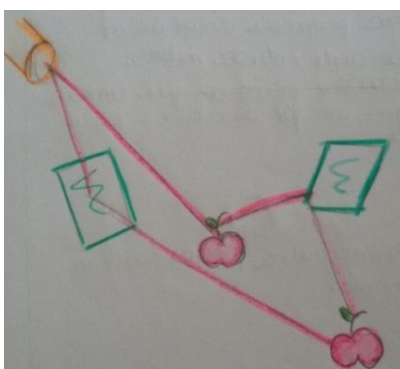


Figura 30 - Desenho da aluna D1 representando o processo de criação do registro holográfico.

A maioria dos 11% de alunos que tentaram descrever o processo de reprodução da imagem holografada, citaram a difração como necessária, como, por exemplo, o aluno F37 afirmando que *“ocorre a difração, o espalhamento da luz cria a imagem com efeito 3D.”*

Outros 8% dos alunos atribuem a criação do holograma a jogos de luz ou projetores especiais altamente tecnológicos, como indicam a descrição dos alunos A4 e H20, a saber: *“com um jogo de luz pode criar a imagem de uma pessoa”* e *“eu não lembro muito na verdade, mas acredito que o holograma é uma imagem tridimensional feita por um projetor ou computador.”*

Pedimos ainda que os estudantes relatassem as atividades realizadas durante o tratamento do conteúdo e acreditamos que foram relatadas as experiências que mais tenham marcado cada estudante. As respostas estão compiladas na Figura 31. As apresentações em *slides* foram as mais lembradas pelos estudantes e incluíam uso de imagens, vídeos e animações. Tais aulas foram mencionadas pelos alunos em 64% dos questionários. O aluno A13 escreveu que *“as atividades que me lembro é das aulas com datashow usando o Power Point e outras onde nós usamos o computador”* e a aluna B30 *“os vídeos mostrando as diferentes ondas ajudaram muito.”*

O uso do software *Modellus* apareceu em 55% das respostas. Entre os alunos que se lembravam do nome do programa está o aluno A33, citando “*o que principalmente me ajudou a entender foi o programa Modellus*”. Em alguns casos, seu nome não era lembrado, mas os alunos descreviam a atividade para se fazer entender, como o aluno C15, que escreveu “*teve as atividades do computador, onde melhoramos nosso conhecimento sobre amplitude, comprimento, período e fase*” e a aluna E1 que relatou “*Foram várias atividades, uma das que eu mais gostei foi a que trabalhamos no computador, pois querendo ou não nos forçou a fazer e aprender. Sinceramente eu não curto muito os gráficos, mas essa atividade eu adorei.*” Outro aspecto mencionado relativo ao uso do software foi o fato das atividades serem realizadas em grupo, como na resposta da aluna F26: “*foram varias apresentações de slides, simulações e atividades com o auxilio do computador em que trabalhávamos em grupo.*”

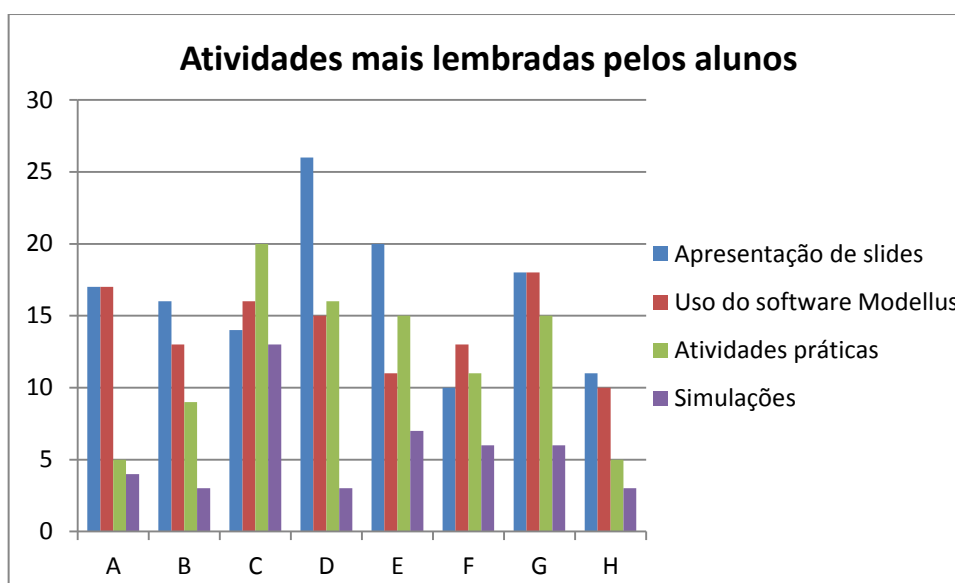


Figura 31 - Atividades realizadas durante a aplicação da sequência mais lembradas pelos alunos, por turma.

Como pode ser percebido na Figura 31, as atividades práticas também tiveram lugar de destaque, sendo mencionadas em 46% das respostas dadas. A aluna F15 destaca a importância da aula experimental para sua aprendizagem quando escreve:

*“A apresentação em sala de aula com a mola e o elástico e os palitos, além de aprofundar meus conhecimentos e me despertar um grande interesse, me fez perceber que não precisa de materiais tão sofisticados para mostrar as ondas.”*

Ainda considerando as atividades experimentais, a aluna D3 destacou *“Quando você pegou um fio de cabelo e jogou o laser foi uma das aulas mais legais.”*

As simulações também foram lembradas por vários alunos que totalizaram 22% dos participantes. O aluno B38 relatou que *“foram feitas atividades com simuladores e experimentos com cordas e molas que me ajudaram bastante.”* Foram citadas, ainda, as possibilidades de interação durante a atividade e a facilidade de acesso à professora por parte dos alunos. No primeiro grupo estão 5% dos estudantes, como aluno B29 ao afirmar *“Tivemos aulas teóricas, práticas e com slides, mas o melhor foram os debates sobre a matéria o que diferenciou as aulas.”* Como exemplo dos 3% de estudantes que valorizaram o acesso dado ao aluno pelo professor, está a aluna B20, citando que *“dentre essas atividades houve uma grande colaboração da professora e além de explicar postava os materiais das aulas no blog e em redes sociais.”*

Os resultados apresentados neste capítulo indicam que a variedade de atividades incluídas na sequência, tais como análise de imagens, vídeos e animações; uso de software para tratamento matemático das ondas e execução de simulações, ainda que realizadas em grandes grupos, promoveram participação e envolvimento efetivos dos estudantes. Considerando apenas as atividades de forte cunho matemático, foi possível evidenciar o crescente envolvimento dos estudantes, uma vez que muitos deles afirmaram ter gostado de realizar as atividades (e ainda aguardar por novas), apreendendo gradativamente a interpretação de expressões matemáticas e construção de gráficos, especialmente com o suporte do software *Modellus*. A discussão dos conteúdos, mesmo subsidiada na projeção de slides, envolveu a participação ativa dos alunos o que foi destacado nos questionamentos apresentados e também serviu para o aprofundamento da abordagem de conceitos através da incorporação de mais atividades.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Baseadas na teoria dos campos conceituais, elaboramos uma sequência didática para abordagem da difração e da interferência luminosas que apresentasse uma variada gama de situações, de modo que os estudantes pudessem vivenciá-las e dominá-las progressivamente.

A sequência foi iniciada a partir de situações problema envolvendo eventos cotidianos, cuja resolução demandaria a formulação de hipóteses e a construção dos conceitos pertinentes. Essas situações foram solucionadas individualmente e depois analisadas em conjunto, na forma de exposição dialogada.

Foram realizadas discussões de imagens, vídeos, animações e simuladores e atividades de manipulação de material lúdico, que subsidiaram diálogos a respeito das ondas, da relação funcional entre suas grandezas características e das representações de interesse neste trabalho. Atividades de construção e análise de gráficos, através do software *Modellus* e roteiros elaborados em papel, foram fundamentais para viabilizar a utilização de sistemas simbólicos matemáticos, como tratamento de equações, tabelas e gráficos. Tais representações também se fizeram presentes, juntamente com o uso da linguagem natural, durante o registro escrito das atividades.

Os 97% dos alunos participantes que afirmaram ter percebido mudanças de pensamento entre os questionários inicial e final, nos levam a acreditar que a sequência teve boa aceitação por parte dos estudantes e esta percepção é corroborada pelas afirmações dos estudantes transcritas no capítulo anterior. Pensamos que a organização proposta resultou numa boa prática de sala de aula.

Consideramos também que as características das ondas foram bem compreendidas uma vez que 80% dos alunos que se mantiveram na escola do início ao fim da sequência, se lembraram do comprimento de onda, 73% da amplitude e 50% da frequência. Poderíamos concluir que o conceito período não foi devidamente compreendido, uma vez que apenas 15% dos estudantes conseguiram caracterizar tal grandeza, no entanto, atribuímos este baixo índice ao fato de que o conceito não foi trabalhado em situações variadas. Isto é um ponto a ser melhorado em outras implementações da sequência, subsidiadas no produto proposto no Apêndice.

Em relação aos fenômenos, o fato da reflexão e da refração serem mais lembradas pelos estudantes, provavelmente por serem tratados em muitas atividades da sequência, mesmo não tendo sido os fenômenos centrais em nenhuma delas, confirma a proposta de Vergnaud, que não é possível analisar uma situação com um único conceito, nem é possível aprender um conceito a partir de uma única situação.

O fato de que apenas 1% dos estudantes conseguiu descrever todo o processo de registro e reprodução da imagem no holograma indica que, apesar de conseguir despertar interesse dos estudantes para o conteúdo, a criação das imagens holográficas não foi plenamente compreendida pela maioria deles. No entanto, os outros 45% de alunos que conseguiram descrever, por meio de textos ou desenhos, parte do processo indica que foram compreendidos os fenômenos necessários à criação destas imagens, que é um resultado satisfatório considerando o tempo disponível para a realização da sequência. Outra observação importante: as respostas dos estudantes apresentam evidências da desmistificação do processo tecnológico envolvido na elaboração de hologramas, pois, no questionário inicial, 57% deles atribuíam a geração de imagens holográficas a um “projektor”, cujo funcionamento corresponderia a uma caixa preta, isto é, a compreensão do funcionamento do projetor referido só seria acessível a gênios privilegiados e não às pessoas comuns.

## REFERÊNCIAS

- ALVES FILHO, J.P.; PINHEIRO, T. F.; PIETROCOLA, M. **A eletrostática como exemplo de transposição didática**. In: PIETROCOLA, M. (org). Ensino de Física: conteúdo metodologia e epistemologia em uma concepção integradora. São Carlos. Editora da UFSC. 2001.
- ARTUSO, A. R; WRUBLEWSKY, M. **Física**. 3 volumes. 1ª ed. Curitiba: Positivo, 2013.
- ASSIS, A. K. T. Newton e suas grandes obras: O Principia e o Óptica. **11º COLE (Congresso de Leitura do Brasil)**. Unicamp. Campinas. p. 37-58, 1998.
- BAGNATO, V. S.; PRATAVIEIRA, S. Luz para o progresso do conhecimento e suporte da vida. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. v. 37, n. 4, 4206, 2015.
- BÔAS, N. V; DOCA, R. H; BISCUOLA, G. J. **Física**. 3 volumes. 1ª ed. São Paulo: Saraiva, 2010.
- \_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. 3 volumes. 2ª ed. São Paulo: Saraiva, 2013.
- BONJORNO, J. R. et al. **Física**. 3 volumes. 1ª ed. São Paulo: FTD, 2013.
- BRASIL. **Ministério da Educação. Secretaria de Educação Básica**. Ciências da natureza, matemática e suas tecnologias. v. 2. Brasília: 2006.
- \_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. Guia de livros didáticos: PNLD 2012: Física. Brasília: 2011.
- \_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. Guia de livros didáticos: PNLD 2015: Física. Brasília: 2014.
- \_\_\_\_\_. **Ministério da Educação. Secretaria de Educação Média e Tecnológica**. Parâmetros Curriculares Nacionais (Ensino Médio). Brasília: MEC, 2000.
- \_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. PCN+ Ensino Médio: Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais - Física. Brasília: MEC, 2000.
- CARDOSO, S. O.; DICKMAN, A. G. Simulação Computacional Aliada à Teoria da Aprendizagem Significativa: uma ferramenta para ensino e aprendizagem do efeito fotoelétrico. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 29, n. Especial 2: p. 891-934, out. 2012.
- CARUSO, F. OGURI, V. **Física Moderna: Origens clássicas e fundamentos quânticos**. Rio de Janeiro. 2ª Reimpressão. Elsevier, 2006.
- CARVALHO, S. H. M. **Einstein – Uma Luz sobre a Luz**. 2005. Disponível em: <http://fisica.cdcc.usp.br/Professores/Einstein-SHMCarvalho/Einstein-SHMCarvalho.pdf>. Acesso em 20 de janeiro de 2015.
- Ciência e Natureza: Forças Físicas. Pedro Paulo Poppovic Consultores Editoriais. Rio de Janeiro – Abril Coleções. 1996.
- CHAVES, A. S. **Física: ondas, relatividade e física quântica**. vol. 3. Rio de Janeiro: Ed. Reichmann & Affonso. 2001.

CORDEIRO, M. D.; PEDUZZI, L. O. Q. Consequências das descontextualizações em um livro didático: uma análise do tema radioatividade. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 35, n. 3, p. 1-11. 2013.

FEYNMAN, R. P.; LEIGHTON, R. B.; SANDS, M. **Lições de Física: edição definitiva**. Porto Alegre: Bookman, 2008.

FORATO, T. C. M. **A natureza da ciência como saber escolar: um estudo de caso a partir da história da luz**. 2009. v2. 222 f. Tese (Doutorado em ensino de ciências e matemática) – Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2009.

GASPAR, A. **Compreendendo a Física: ensino médio**. 3 volumes. 1ª ed. São Paulo: Ática, 2010.

\_\_\_\_\_. 3 volumes. 2ª ed. São Paulo: Ática, 2013.

GICOREANO, J. P.; PACCA, J. L. A. O ensino da óptica na perspectiva de compreender a luz e a visão. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física** 18(1), p. 26-40, Abr. 2001.

GIRCOREANO, J. P. **O Ensino de Óptica e as Concepções sobre Luz e Visão** (Dissertação de Mestrado, São Paulo, FEUSP, 1997).

GONÇALVES FILHO, A.; TOSCANO, C. **Física e realidade**. 3 volumes. 1ª ed. São Paulo: Scipione, 2011.

\_\_\_\_\_. **Física: Interação e Tecnologia**. 3 volumes. 2ª ed. São Paulo: Leya, 2013.

GREF. **Física 2**. 5ª ed. 1ª reimpr. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2002.

HALLIDAY, D., RESNICK, J. W. **Fundamentos de Física, volume 4: óptica e física moderna**. 8ª Ed. Tradução e revisão técnica: Ronaldo Sérgio de Biasi – Rio de Janeiro: LTC, 2009.

KANTOR, C. A. et al. **Quanta Física**. 3 volumes. 1ª ed. São Paulo: PD, 2010.

\_\_\_\_\_. 3 volumes. 2ª ed. São Paulo: Pearson, 2013.

KARAM, R. A. S. **Estruturação matemática do pensamento físico no ensino: uma ferramenta teórica para analisar abordagens didáticas**. (Tese de doutorado em Ensino de Ciências e Matemática. Faculdade de Educação da Universidade de São Paulo. 275 p. São Paulo, 2012).

LUZ, A. M. R.; ÁLVARES, B. A. **Curso de Física**. 3 volumes. 1ª ed. São Paulo: Scipione, 2011.

\_\_\_\_\_. **A. Física: Contexto & Aplicações**. 3 volumes. 1ª Ed. São Paulo: Scipione, 2013.

MOREIRA, M. A. A teoria dos campos conceituais de Vergnaud, o ensino de ciências e a pesquisa nesta área. **Investigações em Ensino de Ciências** – 7(1), p. 7-29, 2002.

NOGUEIRA, C. M. I., REZENDE, V. A Teoria dos Campos Conceituais no Ensino de Números Irracionais: Implicações da Teoria Piagetiana no Ensino de Matemática. **Revista Eletrônica de Psicologia e Epistemologia Genéticas**. Volume 6 Número 1 – Jan-Jul/2014.

NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica**. 1ª Ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1998.

OLIVEIRA, M. P. P et al. **Física em contextos: pessoal, social, histórico.** 3 volumes. 1ª ed. São Paulo: FTD, 2010.

\_\_\_\_\_. **Física – conceitos e contextos: pessoal, social, histórico.** 3 volumes. 1ª ed. São Paulo: FTD, 2013.

PIETROCOLA, M. A Matemática como Estruturante do Conhecimento Físico. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física.** v.19, n. 1, p. 89-109, 2002.

PIETROCOLA, M. **Inovação curricular em física: transposição didática e a Sobrevivência dos saberes.** Trabalho apresentado em mesa redonda no Encontro de Pesquisa em Ensino de Física. Curitiba. 2008.

PIQUEIRA, J. R. C; CARRON, W; GUIMARÃES, J. O. S. **Física.** 3 volumes. 1ª ed. São Paulo: Ática, 2013.

REBORDÃO, J. M. Holografia: Física e aplicações. Colóquio de Ciências. Disponível em [http://ciencias.ulisboa.pt/sites/default/files/fcul/sociedade/Holografia%20-%20F%C3%ADsica%20e%20aplica%C3%A7%C3%B5es%20\(Gulbenkian,%20Col%C3%B3quio%20Ci%C3%A2ncias\).pdf](http://ciencias.ulisboa.pt/sites/default/files/fcul/sociedade/Holografia%20-%20F%C3%ADsica%20e%20aplica%C3%A7%C3%B5es%20(Gulbenkian,%20Col%C3%B3quio%20Ci%C3%A2ncias).pdf)

REZENDE JÚNIOR, M. F., 2006. **O processo de conceitualização em situações diferenciadas na formação inicial de professores de física.** Tese de doutorado, UFSC, Florianópolis. 2006.

RODRIGUES NETO, G. Euclides e a geometria do raio visual. **Scientiæ Dia.** v. 11, n. 4, p. 873-92, São Paulo, 2013.

SALVETTI, A. R. **A História da Luz.** 2 ed. São Paulo. Editora Livraria da Física, 2008.

SANT'ANNA, B. et al. **Conexões com a Física.** 3 volumes. 1ª ed. São Paulo: Moderna, 2010.

\_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. 3 volumes. 2ª ed. São Paulo: Moderna, 2013.

SILVA, C. X.; BARRETO FILHO, B. **Física aula por aula.** 3 volumes. 1ª ed. São Paulo: FTD, 2010.

\_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. 3 volumes. 2ª ed. São Paulo: FTD, 2013.

STEFANOVITS, A. **Ser Protagonista: Física.** 3 volumes. 2ª ed. São Paulo: SM, 2013.

TAUCEDA, K. C., DEL PINO, J. C. Processos cognitivos e epistemologias da teoria dos campos conceituais de Gérard Vergnaud, do ensino narrativo e do aprender a aprender. **Ciências & Cognição** 2014; Vol 19(2) 256-266 <http://www.cienciasecognicao.org>.

VERGNAUD, G. **La teoría de los campos conceptuales. Recherches en Didáctique des Mathématiques** 10 (2, 3), p. 133-170, 1990.

YOUNG, H. D., FREEDMAN, R. A. **Física IV: ótica e física moderna.** São Paulo: Addison Wesley, 2008.

TORRES, C. M. A.; FERRARO, N. G.; SOARES, P. A. T. **Física: Ciência e Tecnologia.** 3 volumes. 2ª ed. São Paulo: Moderna, 2010.

\_\_\_\_\_, PENTEADO, P. C. M. T. **Física: Ciência e Tecnologia.** 3 volumes. 3ª ed. São Paulo: Moderna, 2013.

YAMAMOTO, K.; FUKU, L. F. **Física para o ensino médio.** 3 volumes. 1ª ed. São Paulo: Saraiva, 2010.

\_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. 3 volumes. 3ª ed. São Paulo: Saraiva, 2013.

# Luz

Fenômenos físicos e a  
Matemática das ondas

Sâmia Dantas



Samia Dantas

**Luz: fenômenos físicos  
e a MATEMÁTICA das ondas**

Uberlândia  
2016

Copyright © 2016 Samia Abadia Dantas

Este material didático é produto do trabalho de mestrado da autora, figurando como um anexo de sua dissertação intitulada “IMAGENS HOLOGRÁFICAS COMO TEMA GERADOR PARA ABORDAGEM DOS FENÔMENOS DE INTERFERÊNCIA E DIFRAÇÃO DA LUZ”, defendida junto ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências e Matemática em 25/02/2016.

Arte e editoração eletrônica

Márcia R. Coimbra

Obra catalogada na fonte

---

D192l Dantas, Samia Abadia

Luz: fenômenos físicos e a MATEMÁTICA das ondas / Samia  
Dantas. – Uberlândia, 2016.  
56 p.: il. 21 cm. Edição Digital.

1. Ensino Médio. 2. Interferência e Difração. 3. Modelagem matemática.

CDU 535.4

---

## Apresentação

*É preciso haver outros conceitos, além dos conceitos visuais, para montar uma técnica do agir-cientificamente-no-mundo e para promover a existência, mediante uma fenomenotécnica, de fenômenos que não estão naturalmente-na-natureza.*

**Gaston Bachelard**

Em 2015, diversas atividades foram realizadas em todo o planeta, em comemoração ao Ano Internacional da Luz e das Tecnologias Baseadas em Luz, proclamado pela Assembleia Geral das Nações Unidas. Destacaram-se importantes aniversários: aproximadamente mil anos da publicação do primeiro compêndio sobre Óptica, por AlHazen; bicentenário da publicação do trabalho de Fresnel sobre a natureza ondulatória da luz; cento e cinquenta anos da publicação dos trabalhos de Maxwell, que têm como principal conclusão a descrição da luz como onda eletromagnética; centenário da publicação do trabalho apresentando a Teoria da Relatividade Geral, a qual tem a luz como estrutura central do espaço-tempo; e, finalizando, cinquentenário da detecção experimental da radiação cósmica de fundo por Penzias e Wilson.

Os fenômenos envolvendo luz são agrupados na subárea da Física denominada Óptica, sendo que a reflexão e a refração constituem a Óptica Geométrica, uma vez que a matemática necessária à modelagem da propagação dos raios de luz é a geometria euclidiana; e difração, interferência, polarização e dispersão da luz constituem o que se convencionou denominar Óptica Física.

Inspirada na necessidade de a formação da escola básica possibilitar ao cidadão brasileiro a compreensão de fenômenos do tempo presente, a autora agrega, nessa obra, uma miríade de atividades para abordar em sala de aula do ensino médio o tema luz, seus fenômenos e fenomenotécnica. Esse último conceito é emprestado de Gaston Bachelard, para referir-se

a experimentos concebidos para corroborar uma dada teoria, situação muito frequente na história do desenvolvimento de modelos e teorias, particularmente, para a descrição e compreensão da luz quanto à sua geração, propagação e interação com a matéria. A difração de Fresnel é um exemplo de fenomenotécnica premiado pela Academia Francesa de Ciências do início do século XIX. Sua abordagem no ensino médio não é adequada do ponto de vista matemático, mas é possível evidenciar os mesmos princípios na forma mais simples, a difração de Fraunhofer.

A autora vai tecendo sua proposta articulando diferentes conceitos, experimentos didatizados, simulações e animações, e algumas atividades com suporte do pacote *Modellus* para chegar a uma descrição da produção e reprodução de imagens holográficas.

Uma forma de produzir um holograma, segundo o trabalho de Dennis Gabor, é através da incidência de um feixe laser sobre um espelho semitransparente e semirrefletor, o que significa que o feixe é dividido em dois, uma parte transmitida, encaminhada ao objeto a ser fotografado e redirecionada a uma película fotossensível, enquanto a outra parte, a refletida, denominada onda de referência, é dirigida diretamente para a película. Ao serem recombinados sobre a película, os feixes formam um padrão de interferência, recriando a imagem tridimensional correspondente ao objeto. Por outro lado, é possível obter uma imagem 3D pela superposição de duas fotos tiradas em pontos diferentes, uma em cor verde e outra em vermelha. Ao observar essas fotos com óculos especiais, nos quais uma lente é vermelha e a outra é verde, cada olho dos seres humanos separa as imagens pela cor e, ao serem rearticuladas no cérebro, criam a impressão de três dimensões. Para qualquer um dos casos, o aspecto importante é a diferença de caminho óptico ou, a diferença de número de comprimentos de onda para um mesmo espaço. As funções trigonométricas são o tratamento matemático natural para a descrição do comportamento ondulatório da luz e, a utilização do pacote *Modellus* permitiu explorar essas funções, tanto na sua representação algébrica, quanto funcional e gráfica.

Almejando incluir temas de física moderna e contemporânea no currículo do Ensino Médio, de forma não exclusivamente conceitual, mas matematicamente adequada, a autora

ingressou na primeira turma do Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências e Matemática da Universidade Federal de Uberlândia e à minha tutela, em 2013. Esse caminho foi trilhado ao longo de três anos de trabalho, longas idas e vindas entre a sala de aula da escola pública e a universidade.

Espero que o professor desse nível, nosso principal público alvo, tenha os mesmos encanto e satisfação em conhecer e, eventualmente, utilizar as atividades desenvolvidas, que eu tive ao discutir sua concepção e implementação com minha parceira e orientanda.

Uberlândia-MG, janeiro de 2016.

***Débora Coimbra***

Coordenadora do Programa de Pós-Graduação  
em Ensino de Ciências e de Matemática  
da Universidade Federal de Uberlândia

## Sumário

<b>04  </b>	<b>Apresentação;</b>
<b>09  </b>	<b>Ao Professor: primeiras palavras;</b>
<b>09  </b>	<b>Introdução;</b>
<b>18  </b>	<b>Chegando a um conceito para onda;</b>
<b>20  </b>	<b>Classificações das ondas;</b>
<b>22  </b>	<b>Conhecendo as características da onda;</b>
<b>27  </b>	<b>A velocidade da onda;</b>
<b>29  </b>	<b>Equacionando e modelando matematicamente uma onda eletromagnética;</b>
<b>46  </b>	<b>Interferência de ondas;</b>
<b>61  </b>	<b>Difração;</b>
<b>71  </b>	<b>Polarização;</b>
<b>77  </b>	<b>Enfim, o holograma;</b>
<b>84  </b>	<b>Referências</b>

## Ao Professor: primeiras palavras

Este material constitui uma proposta didática tendo as imagens holográficas como tema gerador para tratamento da interferência e da difração da luz no ensino médio. Considerando que os fenômenos em questão corroboram o comportamento ondulatório da luz, acreditamos que seja pertinente iniciar a apresentação do conteúdo dando aos alunos a oportunidade de conhecer conceitos ligados à ondulatória, necessários à compreensão da interferência e da difração.

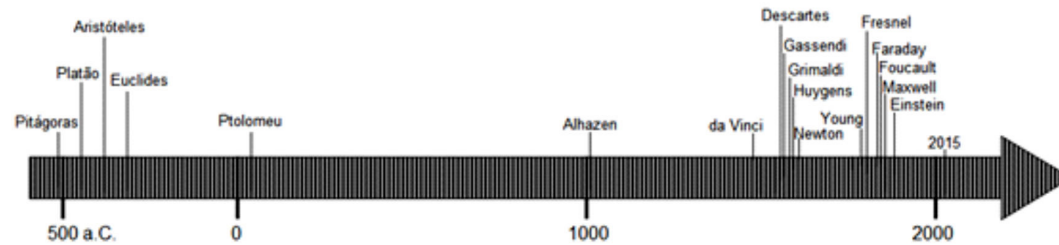
É importante incentivar a liberdade de expressão e o respeito entre os alunos durante a realização das atividades, promovendo um ambiente onde o aluno se sinta confortável para fazer perguntas e dar opiniões, enfim, participar ativamente das aulas.

Para evitar transtornos, verifique, com antecedência, a disponibilidade dos recursos necessários para a realização de cada atividade prevista, como o computador conectado ao projetor multimídia e a instalação do *software Modellus* nos computadores para uso dos alunos. O pacote é de fácil acesso e utilização amigável, tanto para instalação quanto para implementar os roteiros e pode ser encontrado em <https://drive.google.com/file/d/0B-KWZ4pgvMISNW1jMUvpdzJtZEK/view?usp=sharing>.

## Introdução

A fim de investigar o que os estudantes já conhecem a respeito do tema, sugerimos que pergunte aos seus alunos o que eles acreditam que seja a luz e qual o caminho percorrido por ela para possibilitar a visão. Caso eles discordem uns dos outros, argumente que não há problemas em não saber, uma vez que essas questões inquietaram a humanidade por muitos séculos. A linha do tempo, que consta na Figura 1, é uma síntese dos principais cientistas que se destacaram com suas teorias sobre a natureza, especialmente sobre a propagação e os fenômenos ocorridos com a luz.

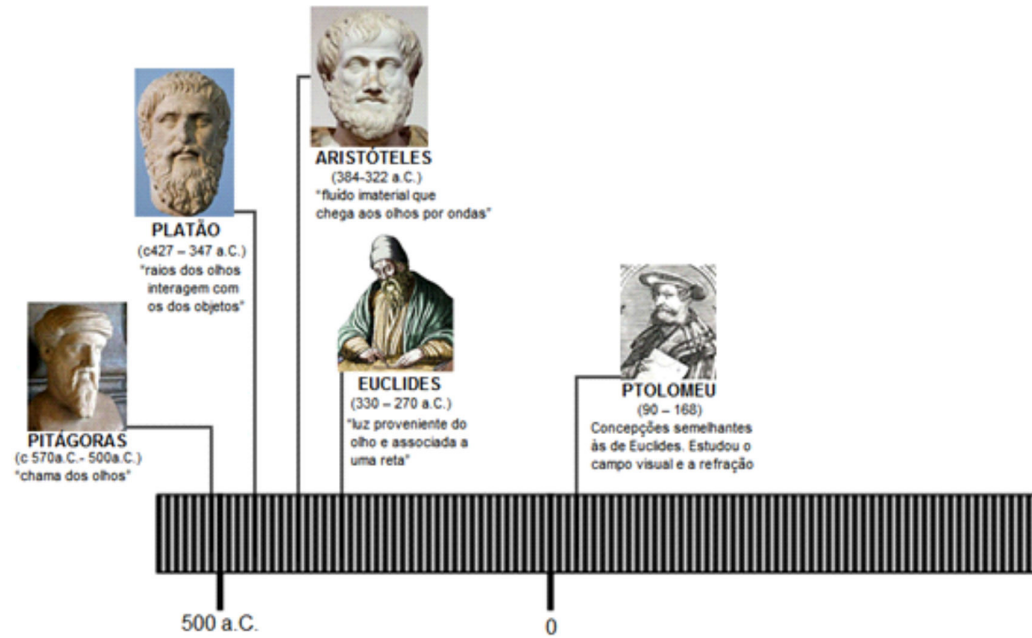
Figura 1 - Linha do tempo.



Fonte: autoria própria.

A linha do tempo pode ser apresentada com uso de projetor multimídia, e para facilitar a visualização dividimos em três partes – Figuras 2, 3 e 5 – contendo imagens dos pensadores e um breve comentário a respeito de suas teorias.

Figura 2 - Primeira parte da linha do tempo.

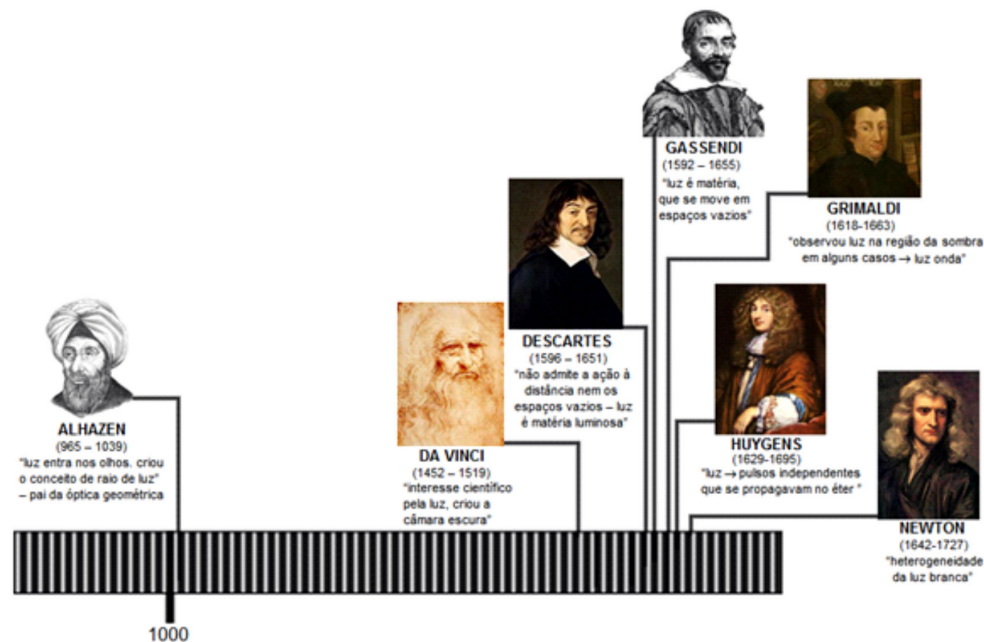


Fonte: As fotos usadas foram obtidas de <https://pt.wikipedia.org/wiki/>.

Historicamente, o estudo da Óptica era relacionado ao processo de visão. Para Pitágoras (582 – 500 a.C.), a visão seria comparada ao tato, pois a luz sairia dos olhos, tocaria os objetos e voltaria aos olhos com as informações dos objetos tocados. Ainda, de acordo com o pensador, os humanos não enxergariam bem a noite devido à baixa intensidade de sua chama nos olhos que, durante o dia, era somada à luminosidade do ambiente no caminho de ida e volta até os olhos. Platão (c427 – 347 a.C.) também considerava que os raios de luz se originariam nos olhos e interagiriam com a emissão dos objetos na presença da luz solar.

Para Aristóteles (384-322 a.C.), a luz seria uma espécie de fluído imaterial que chegaria aos olhos vindo dos objetos visíveis, em forma de ondas. Euclides (330 – 270 a.C.) também acreditava que a luz era proveniente do olho. Fazendo uso do raio pitagórico-platônico e associando-o a uma linha reta, Euclides tornou possível uma geometrização da visão, exercendo grande influência no desenvolvimento da óptica geométrica e oferecendo recursos para solução de problemas práticos em diversos campos, como na cenografia, arquitetura e escultura. Claudio Ptolomeu (90 – 168), que tinha concepções semelhantes às de Euclides, fez estudos sobre campo visual e refração da luz.

Figura 3 - Segunda parte da linha do tempo.



Fonte: As fotos usadas foram tiradas de <https://pt.wikipedia.org/wiki/>

Não foram apenas os gregos a se ocupar da luz e de seu comportamento, chineses e árabes também conheciam alguns princípios da Óptica. Os primeiros utilizavam espelhos côncavos como queimadores e o árabe Ibn Al-Haytham (965 – 1039), conhecido como Alhazen, fez vários estudos nessa área, redigindo o primeiro compêndio sobre o tema de que se tem registro. Esse cientista e matemático deu explicações coerentes sobre alguns fenômenos ópticos e é atribuído a ele o conceito de raio de luz. Ele questionou a ideia de que a luz sairia dos olhos argumentando que, se é necessário fechar as pálpebras ao olhar para o Sol, é por que algo estaria entrando e não saindo. Sua obra foi traduzida para o latim no final do século XII e exerceu grande influência na óptica ocidental.

Leonardo da Vinci (1452 – 1519) foi levado, pelo seu interesse mais científico do que artístico pela luz, a estudar fenômenos ópticos e a conceber a câmara escura, precursora das máquinas fotográfica e filmadora. O filme “Moça com Brinco de Pérola” mostra a utilização de uma câmara escura pelo pintor Johannes Vermeer, para a elaboração dos seus quadros. René Descartes (1596 – 1651) não admitia a ação à distância nem a existência de espaços vazios, explicando todos os fenômenos naturais em termos de matéria e movimento. Na sua concepção, a luz seria a matéria luminosa, um dos elementos de matéria existente, o mais sutil que se propagaria através do segundo, o éter. Este éter seria também sutil, transparente e invisível formando imensos vórtices que circundavam os planetas (feitos do terceiro tipo de matéria – opaco e denso). A luz seria um tipo de pressão transmitida instantaneamente através do éter, pelo espaço.

Como na filosofia cartesiana, o atomismo, sob a perspectiva da obra de Pierre Gassendi (1592 – 1655), explicava os fenômenos naturais em termos de matéria e movimento, com a diferença de que o segundo defendia a existência de espaços vazios. Para os atomistas, a luz seria constituída de pequenas partículas que se deslocavam em alta velocidade, tornando dispensável a ideia de éter como um meio para a propagação da luz.

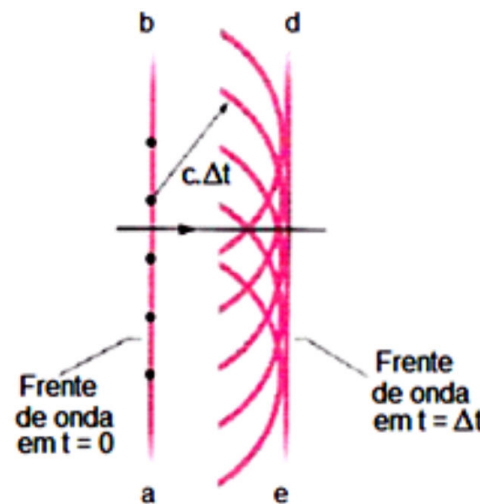
Em 1655, surge um fenômeno interessante dos experimentos do padre Francesco Grimaldi (1618-1663). Ele observou que havia luz na região da sombra geométrica de um objeto delgado, provocada por uma forte luz ao atravessar um pequeno orifício. Ele chamou o fenômeno de difração (a luz se fraciona em duas partes) e sua concepção da luz é essencialmente ondulatória. Para explicar a difração fez uma analogia às ondas na água que são difratadas ao passar por um barco. Sua concepção ondulatória da luz permitiu explicar a formação de cores. Quando a luz atravessa um prisma, as diferentes cores seriam resultado das diferentes velocidades do movimento vibratório do fluído que atua sobre o olho, da mesma forma que as diferentes velocidades vibrações do ar levam a uma diversidade de sons.

Christiaan Huygens (1629-1695) imaginava a luz como pulsos independentes que se propagavam no éter de forma análoga à propagação do som no ar. Com essa teoria ele conseguiu explicar fenômenos como a propagação retilínea da luz, a reflexão e a refração.

Em seu “Tratado sobre a luz”, de 1690, Huygens apresenta uma explicação baseada no conceito de frente de ondas, atualmente conhecido como Princípio de Huygens, que diz que

na propagação destas ondas, cada partícula do éter não só transmite o seu movimento à partícula seguinte, ao longo da reta que parte do ponto luminoso, mas também a todas as partículas que a rodeiam e que se opõem ao movimento. O resultado é uma onda em torno de cada partícula e que a tem como centro. (HUYGENS *apud* CARVALHO, 2005).

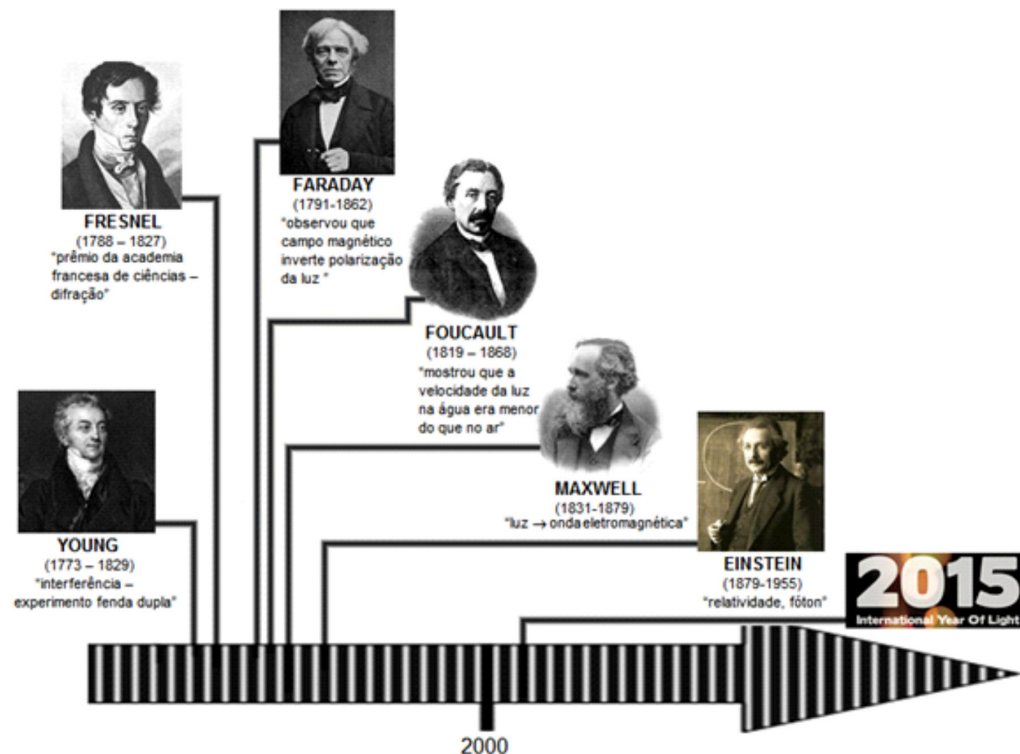
**Figura 4 - Propagação de uma onda plana no vácuo de acordo com o princípio de Huygens.**



Fonte: HALLIDAY, RESNICK, 2009.

Mesmo com alguns filósofos naturais defendendo a teoria ondulatória para a luz, a teoria corpuscular de Isaac Newton (1642-1727), elaborada no final do século XVII, foi a mais aceita e defendida ao longo do século XVIII. Quanto à heterogeneidade da luz branca, foram necessários vários experimentos e uma análise sofisticada para compor a sua argumentação. Quando criticado a respeito da teoria das cores, Newton responde alegando que qualquer teoria para a luz – corpuscular ou ondulatória – deveria se adaptar à heterogeneidade da luz, pois esta já era para ele um fato comprovado.

Figura 5 - Terceira parte da linha do tempo.



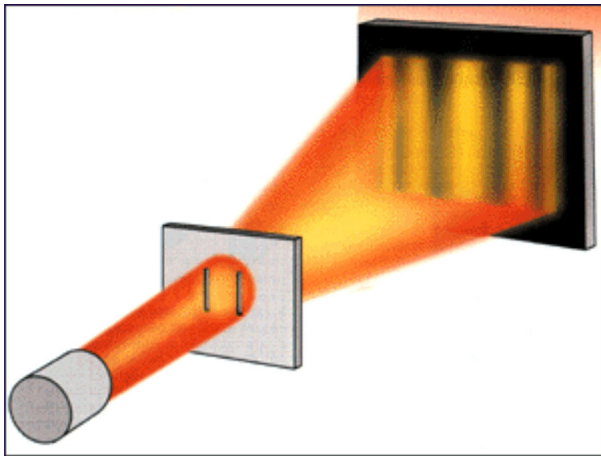
Fonte: As fotos usadas foram tiradas de <https://pt.wikipedia.org/wiki/>

Ao longo do século XVIII, a Física contava com duas teorias mutuamente excludentes para a luz. De um lado a teoria corpuscular segundo a qual a luz era composta por minúsculas partículas emitidas pelos corpos lu-

minosos e que se deslocavam através de espaços vazios e de corpos transparentes e de outro a teoria ondulatória que concebia a luz como uma onda que se propagava no éter, substância muito sutil que preenchia os espaços entre os corpos. Escolher entre essas teorias implicava também na escolha entre fragilizar ou não um corpo de conhecimento bem articulado, desenvolvido a partir da doutrina newtoniana e escolher entre concepções distintas do funcionamento do universo. O impasse entre as teorias não encontrava solução mediante análise da reflexão ou da refração da luz, uma vez que ambas as teorias explicavam satisfatoriamente os dois fenômenos.

Apesar de aparente predominância da crença na teoria corpuscular, alguns pontos requeriam esclarecimentos: alguns fenômenos, como difração e interferência, permaneciam sem explicação satisfatória segundo essa teoria e uma corrente de investigação procurava detectar o movimento da Terra em relação ao éter.

Thomas Young (1773 – 1829), que estudava fenômenos relacionados ao som, retomou as ideias da teoria ondulatória para a luz e realizou, em 1801, um experimento encontrando um efeito caracteristicamente ondulatório: a interferência. Young explicou que ao atravessar o anteparo com duas fendas a luz era “espalhada” formando frentes de onda circulares que interferiam entre si causando as regiões claras e escuras no segundo anteparo.



**Figura 6 - Representação da experiência de Young com duas fendas estreitas entre a fonte de luz e o anteparo.**

Fonte: <http://www.passenaufgrs.com.br/noticias/n.php?i=16947>

No entanto, o experimento da dupla fenda de Young não convenceu a maior parte da comunidade científica da época. Em 1817, a Academia de Ciências francesa propôs um prêmio para a melhor explicação para o fenômeno da difração. O vencedor do prêmio foi Augustin Fresnel (1788 – 1827), com um trabalho que defendia a teoria ondulatória da luz. O surpreendente neste resultado foi o fato de

todos os integrantes da comissão julgadora serem defensores da teoria corpuscular. Durante uma demonstração de Fresnel, o matemático Denis Poisson (1781-1840) apontou que, caso a teoria de Fresnel estivesse correta, um ponto brilhante deveria aparecer no centro da sombra projetada de um disco circular. Para surpresa de muitos, em especial de Poisson, partidário da teoria corpuscular, verificou-se o fato.

Em 1862, Léon Foucault (1819 – 1868) mostrou que a velocidade da luz na água era menor do que no ar, contrariando as previsões de Newton e desprestigiando sua teoria corpuscular da luz. Em 1845, Michael Faraday (1791-1862) inferiu que um campo magnético podia inverter os planos de polarização da luz (Efeito Faraday) concluindo que luz e magnetismo são resultados de uma mesma substância. Em 1865, James Clerk Maxwell (1831-1879) demonstrou que a luz era uma onda eletromagnética e que os fenômenos percebidos para a luz deveriam ocorrer com as demais ondas de mesma natureza. A comprovação experimental para o trabalho de Maxwell veio apenas em 1888 com os experimentos de Henrich Hertz (1857-1894).

Os trabalhos de Albert Einstein (1879-1955) deram outra perspectiva ao tratamento da luz. Para explicar o efeito fotoelétrico, Einstein propôs o *quantum* de energia, segundo o qual a luz teria natureza corpuscular, o que nos leva a entender hoje, a natureza da luz apresentando uma dualidade onda-partícula. Einstein postulou, ainda, a velocidade da luz como absoluta, isto é, sempre constante independentemente do estado de movimento do observador. Para tanto, ele rompeu com os conceitos de espaço e tempo absolutos da Física Clássica, inaugurando a Teoria da Relatividade Especial.

O ano de 2015 foi proclamado o Ano Internacional da Luz e das Tecnologias baseadas em Luz na Assembleia Geral das Nações Unidas por marcar o 1000º aniversário do trabalho de Alhazen (aproximadamente), os 100 anos da teoria da Relatividade Geral de Einstein, os 110 anos da explicação do efeito fotoelétrico, também de Einstein e os 50 anos da descoberta da radiação cósmica de fundo. Esta proclamação pretende destacar a importância da luz e das tecnologias ópticas na vida dos cidadãos, assim como no futuro e no desenvolvimento das sociedades de todo o mundo.

“Ao proclamar um Ano Internacional com foco na ciência óptica e em suas aplicações, as Nações Unidas reconhecem a importância da conscientização mundial sobre como as tecnologias baseadas na luz promovem o desenvolvimento sustentável e fornecem soluções para os desafios mundiais nas áreas de energia, educação, agricultura, comunicação e saúde. A luz exerce um papel essencial no nosso cotidiano e é uma disciplina científica transversal obrigatória para o século XXI. Ela vem revolucionando a medicina, abrindo a comunicação internacional por meio da internet e continua a ser primordial para vincular aspectos culturais, econômicos e políticos da sociedade mundial.” (<http://www.unesco.org/new/pt/brasil/ia/about-this-office/prizes-and-celebrations/2015-international-year-of-light>)

O questionário indicado na Figura 7 é constituído por cinco situações cotidianas nas quais é necessária a evocação do comportamento ondulatório para a formulação de hipóteses e de explicações. Pode ser aplicado a fim de investigar os conhecimentos prévios dos alunos a respeito da luz em uma perspectiva ondulatória.

Nome e número	Disciplina <b>FÍSICA</b>	Professora <b>SAMIA</b>	Série / Turma <b>2º</b> ____	Data / / <b>2015</b>
---------------	-----------------------------	----------------------------	---------------------------------	-------------------------

**QUESTIONÁRIO PRELIMINAR**


**01.** Na ola, coreografia realizada por espectadores em eventos esportivos ou musicais, os participantes levantam-se e erguem os braços consecutivamente em fileiras sucessivas. A OLA cria o efeito visual de movimento entre as arquibancadas que se assemelha a um ente físico. Que ente físico é esse? Descreva características dele.

**02.** Em março de 2014, um avião Boeing 777 da Malaysia Airlines desapareceu no trajeto entre o aeroporto de Kuala Lumpur, na Malásia, e a capital chinesa Pequim. Esse evento tem sido alvo de grandes especulações desde então. Até hoje, o paradeiro do avião é um mistério. Como é rastreado um avião no ar? E no fundo do oceano? Em que essas formas de rastreamento se assemelham? E como se diferenciam?

**03.** A música é um artefato cultural que agrada a praticamente todas as pessoas. O som musical, em geral, é aquele que se apresenta de forma agradável aos ouvidos e existem músicas para todos os gostos. Quais são as diferenças entre som musical e um ruído?

**04.** A opção de assistir filmes em 3D está a cada dia mais popular, pois, além dos cinemas existem computadores e televisores que oferecem o recurso. Como você pensa que é formada a imagem nas projeções 3D? Explique.

**05.** No filme *"Resident Evil 3: a extinção"* são exibidas cenas de "reuniões holográficas", nas quais nem todos os participantes estão presentes fisicamente. Você considera que essas situações são possíveis ou apenas ficção criada para o cinema? Explique como seriam criados os hologramas.



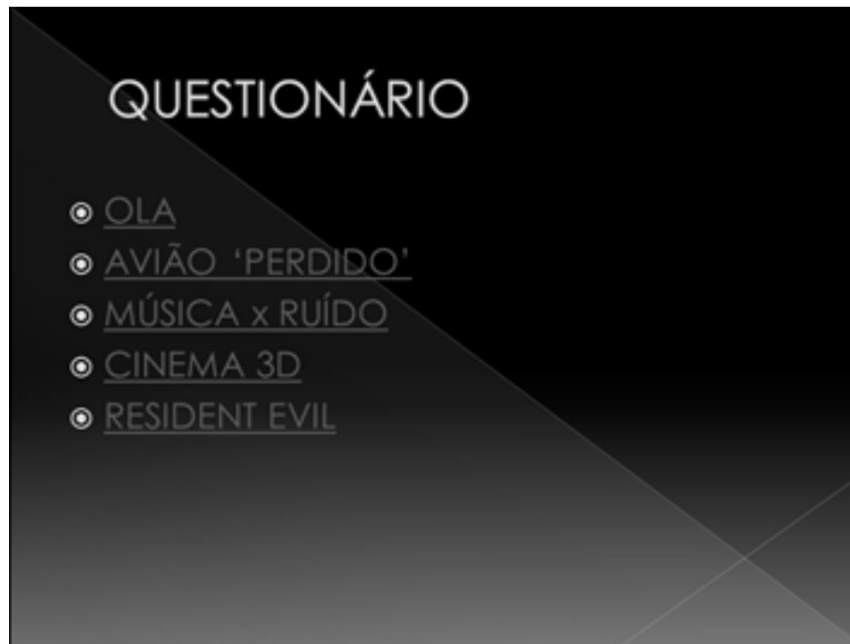
**Figura 7 - Questionário Preliminar.**

Fonte: própria da autora

As perguntas apresentadas no questionário podem despertar o interesse dos alunos pelo tema, além de subsidiar a introdução do conteúdo.

## Chegando a um conceito para onda

Em apresentação em *Power Point*, ou outro programa de sua preferência, coloque hiperlinks com imagens ou vídeos relativos às questões apresentadas no questionário da aula anterior (Figura 7), como sugerido na Figura 8.

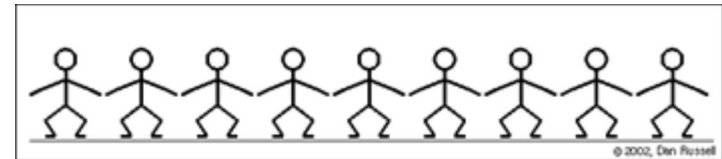


**Figura 8 - Apresentação multimídia para retomar as perguntas do questionário.**

Fonte: própria da autora

A ideia é que os alunos possam expor suas opiniões e você tente fechar a resposta, junto com eles, ainda sem um aprofundamento dos conceitos.

**Figura 9 - Animação mostrando a OLA**



Para ilustrar a OLA e iniciar a discussão, sugerimos a animação indicada na Figura 9, que pode ser encontrada no endereço <http://www.acs.psu.edu/drussell/Demos/waves-intro/waves-intro.html>. É interessante que durante a conversa você considere as respostas dos alunos ao questionário e parta delas para fazer suas considerações.

A Figura 10 é uma sugestão para fomentar a discussão a respeito das formas de se rastrear um avião ou partes dele no ar ou no oceano.

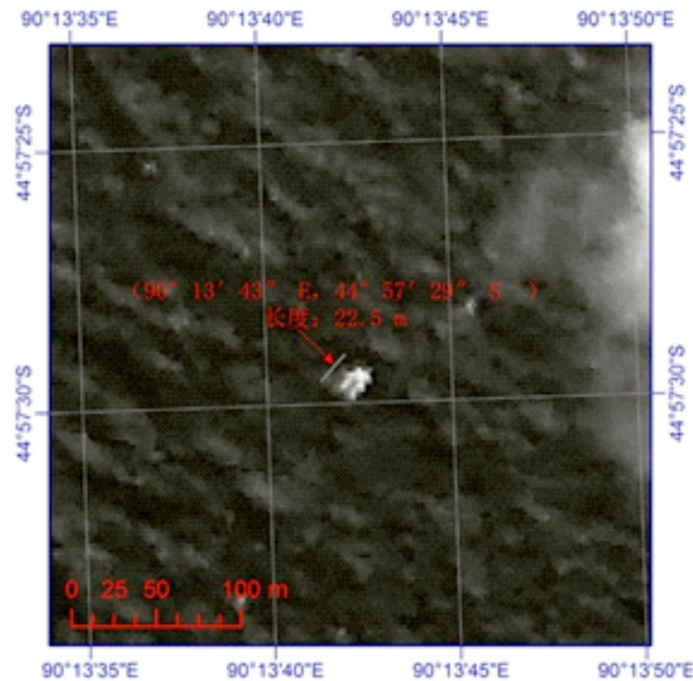
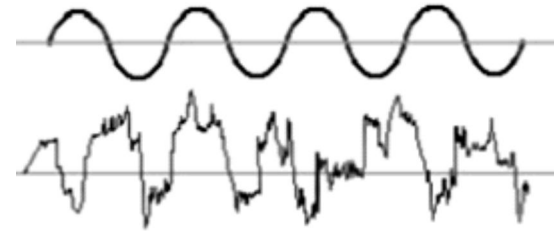


Figura 10 - Imagem de satélite chinês com possível parte do avião desaparecido.

Fonte: <http://www1.folha.uol.com.br/mundo/2014/03/1429434-china-divulga-imagens-de-objetos-que-podem-ser-de-aviao-desaparecido.shtml>

Ao considerar a diferença entre música e ruído, sugerimos que você apresente a imagem indicada na Figura 11, perguntando aos alunos qual das imagens corresponde a cada um e por que eles consideram que seja assim.

Figura 11 - representação de um som musical simples e de um ruído.



Fonte: <http://pt.slideshare.net/ratosdotecnico/acustica-27525167>

A Figura 12 traz uma sugestão de imagem para fomentar a discussão a respeito da projeção dos cinemas em 3D.

Figura 12 - Imagem projetada para observação 3D sem uso dos óculos polarizadores.

Fonte: <http://chc.cienciahoje.uol.com.br/cinema-3d-sem-oculos/>



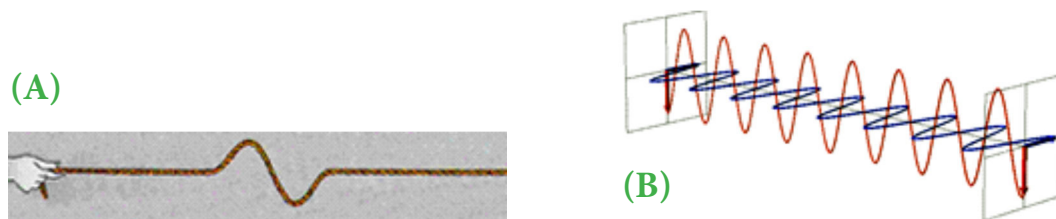
Para mostrar aos alunos a cena do filme *Resident Evil 3*: a extinção, citada no questionário, sugerimos a locação do mesmo.

Sugerimos que as discussões acerca das questões sejam conduzidas de forma que se chegue, juntamente com os alunos, a um conceito de onda. É importante que seja destacada a condição de que as ondas transportam energia sem o transporte de matéria.

## Classificações das ondas

Para elucidar que as ondas podem ser, quanto à sua natureza, mecânicas ou eletromagnéticas, sugerimos o uso das animações disponíveis em <https://gifsdefisica.wordpress.com/gifs-de-molas-e-movimento-ondulatorio/> e <https://bioressonancia.wordpress.com/sobre-a-biorressonancia/>. A primeira apresenta um pulso em uma corda, como pode ser visto na Figura 13A e a segunda, representada na Figura 13B, mostra a oscilação dos campos elétrico e magnético que constituem as ondas eletromagnéticas.

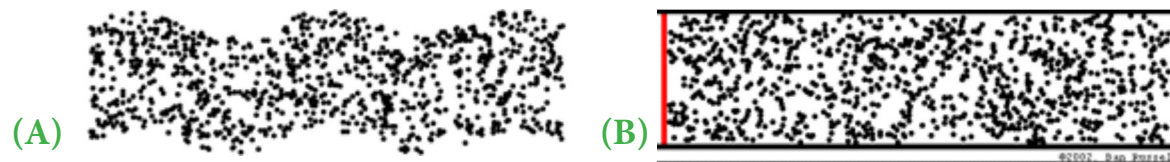
**Figura 13 - Aspecto da animação utilizada para representar ondas (A) mecânicas e (B) eletromagnéticas.**



É interessante destacar que, caso as ondas eletromagnéticas se propaguem através de um meio material, os pontos do meio não sofrem vibrações como nas ondas mecânicas.

Para melhor esclarecimento sobre as ondas transversais e longitudinais, caracterizadas pela direção de vibração ou oscilação, sugerimos as animações disponíveis em <http://www.acs.psu.edu/drussell/Demos/waves/wavemotion.html>.

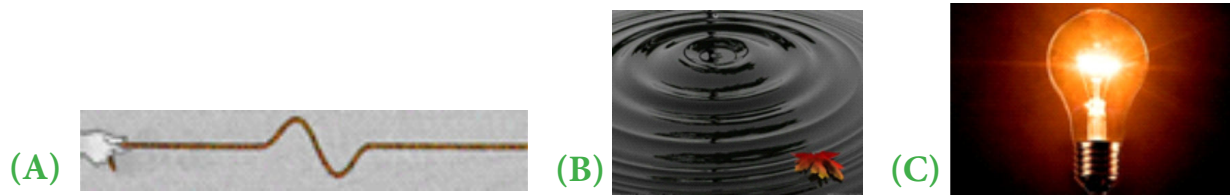
**Figura 14 - Aspecto das animações sobre ondas (A) transversais e (B) longitudinais.**



Fonte: autoria própria:

As animações representadas na Figura 14 deixam clara a diferença entre as vibrações que são (A) perpendiculares à direção de propagação da onda e aquelas que são paralelas (B) a essa direção de propagação. Ainda quanto à direção de propagação, as ondas podem ser unidimensionais, bidimensionais e tridimensionais e para mostrá-las aos estudantes sugerimos que sejam utilizadas imagens como a Figura 15.

**Figura 15 - (A) Onda na corda. (B) Onda na superfície da água. (C) Luz de uma lâmpada iluminando todo o ambiente.**



Fonte A: <https://gifsdefisica.wordpress.com/gifs-de-molas-e-movimento-ondulatorio/>.

Fonte B: <http://desconversa.com.br/fisica/resumo-ondas/>.

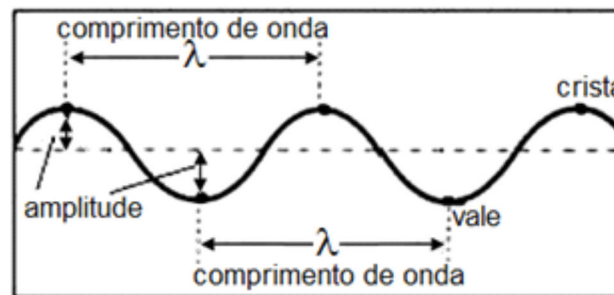
Fonte C: <http://www.conscienciaampla.com.br/2014/01/27/qual-o-melhor-tipo-de-lampada/>.

Na Figura 15 (A), a onda na corda representa as ondas que se propagam em uma dimensão, (B) a onda bidimensional é representada pela onda na superfície da água tranquila e (C) a luz de uma lâmpada iluminando todo o ambiente em que se encontra serve para ilustrar a onda que se propaga nas três dimensões. É esperado que alguns estudantes fiquem confusos em relação aos dois últimos tipos. Para esclarecer enfatize que a propagação da onda na água acontece nas várias direções do plano formado pela superfície da mesma.

## Conhecendo as características da onda

A onda é caracterizada por grandezas como amplitude, comprimento, período, frequência e velocidade de propagação. Para que essas grandezas fiquem claras para os estudantes, sugerimos que seja dedicado um tempo para apresentar os elementos da onda, como na Figura 16.

Figura 16 - Elementos da onda.



Fonte: própria da autora.

Na Figura 16, estão destacados vale e crista bem como a amplitude e o comprimento de onda para o caso de uma onda na corda. A partir desses elementos é possível definir o período  $T$  da onda como o intervalo de tempo necessário até que um ponto da corda que ocupa a posição de crista se mova até a posição de vale e retorne à primeira, ou seja, para que este ponto realize uma oscilação completa.

O período  $T$  pode ser determinado pela Equação (1), na qual  $\Delta t$  representa o tempo gasto para que um ponto da corda complete uma quantidade  $n$  de oscilações.

$$T = \frac{\Delta t}{n}$$

Seguindo a mesma notação, a Equação (2) fornece o valor da frequência  $f$  da onda, que pode ser definida como quantidade de oscilações completas em uma unidade de tempo.

$$f = \frac{n}{\Delta t}$$

É importante que sejam destacadas as unidades de medida das grandezas apresentadas. No sistema internacional de unidades são segundo (s) para o período e hertz ( $\text{Hz} = \text{s}^{-1}$ ) para a frequência. As grandezas período e frequência podem ser relacionadas através de

$$f = \frac{1}{T}$$

Para auxiliar na elucidação das grandezas apresentadas, sugerimos que seja explorada a simulação Onda em uma Corda, disponível em <https://phet.colorado.edu/pt/simulation/legacy/wave-on-a-string>, cuja tela inicial está apresentada na Figura 17. O simulador pode ser usado através de conexão com a internet sem exigir nenhuma instalação no computador e pode ser baixado para uso off-line, mas neste caso exige que esteja instalado na máquina o software Java.

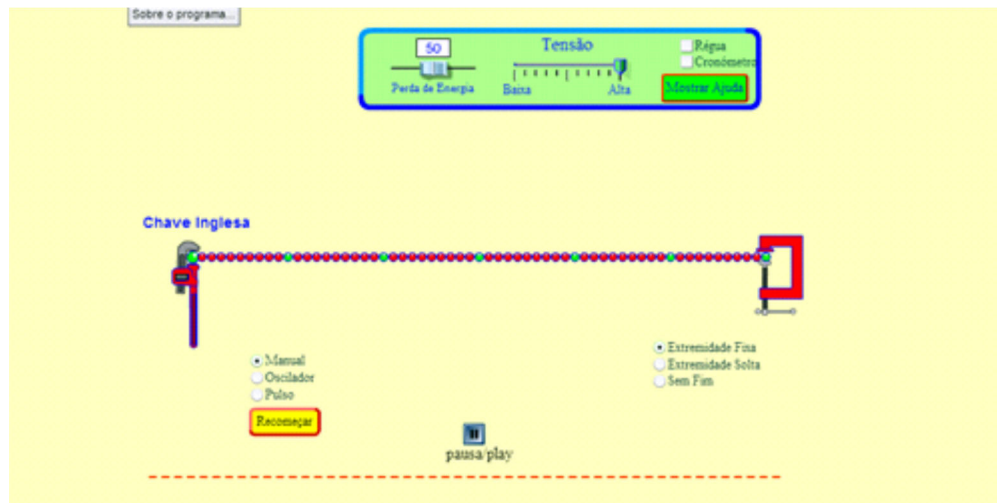
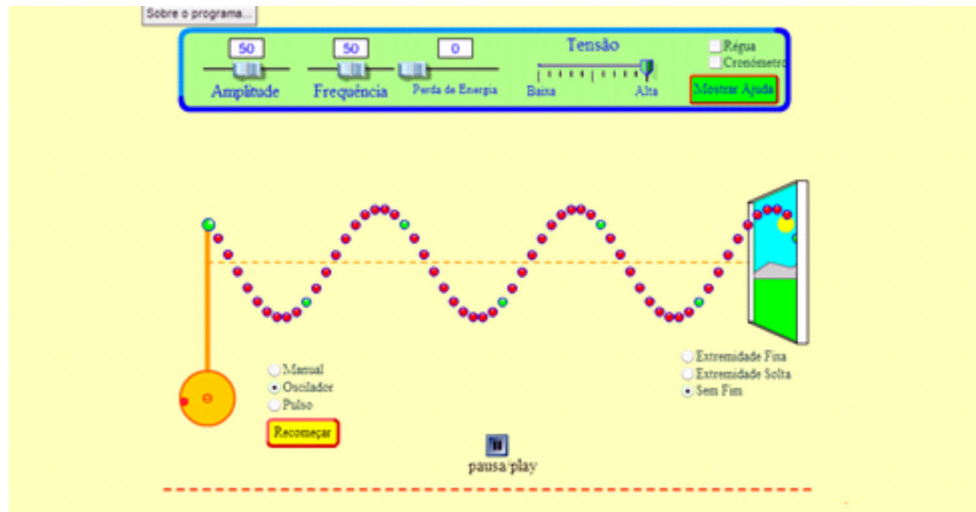


Figura 17 - Tela inicial da simulação Onda em uma Corda.

Recomendamos que você inicie o uso da simulação mostrando que ao movimentar a chave inglesa em modo manual uma oscilação irregular se estabelece na corda e que com o modo pulso não é fácil conseguir manter a frequência das

oscilações, por isso o uso do oscilador automático se torna uma opção de mais fácil uso e observação.

Para melhor visualização das grandezas, é interessante que o simulador seja configurado com extremidade sem fim e com valor zero para a perda de energia e, nesse caso, aparecerá como na Figura 18.



**Figura 18 - Simulador configurado para oscilador automático, extremidade sem fim e perda zero de energia.**

Consideramos importante o esclarecimento aos alunos que a extremidade infinita foi escolhida para não ser necessário avaliar, ainda, a reflexão da onda nas extremidades fixa e solta. No caso da perda zero de energia, é importante explicar que é apenas um recurso para melhor observação da

onda e que, na realidade sempre há alguma perda de energia durante sua propagação.

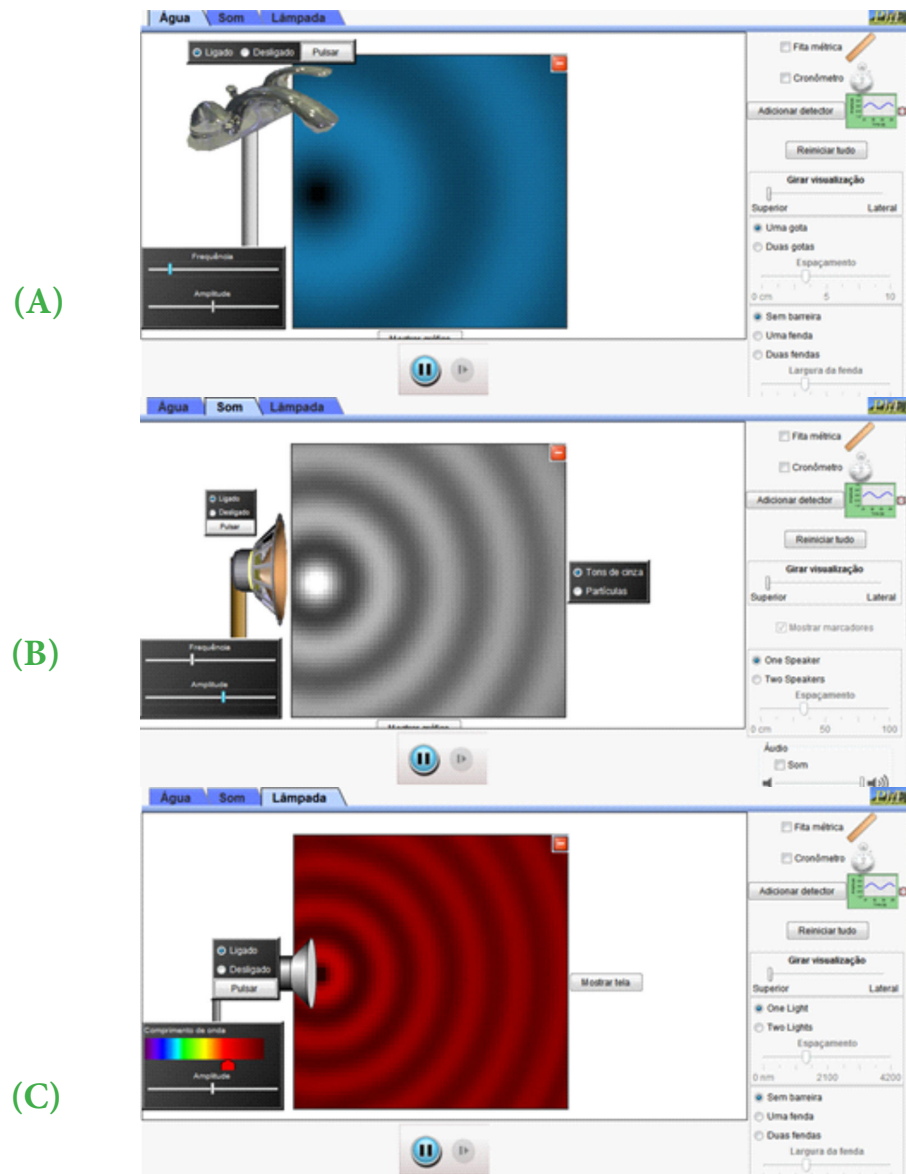
A seguir, você pode explorar a função de modificar a tensão na corda e como a velocidade da onda se modifica com sua alteração. Vale destacar, também, que os pontos verdes da corda permitem observar que cada um oscila na vertical sem deslocamento horizontal, verificando que a onda não transporta matéria.

Varie o valor da amplitude com o botão correspondente. Se julgar necessário, ative o recurso régua para que os alunos possam acompanhar melhor a variação da amplitude. Faça alterações na frequência e peça que os alunos observem a modificação correspondente no comprimento de onda. É possível, observando a simulação, levar os alunos a perceber que, quando a onda mantém a mesma velocidade de propagação, seu comprimento de onda e sua frequência são inversamente proporcionais.

Passe a explorar, então, a simulação Interferência de Ondas, disponível em <https://phet.colorado.edu/pt/simulation/legacy/wave-interference>. Esclareça aos alunos que, neste primeiro contato com o simulador, não se-

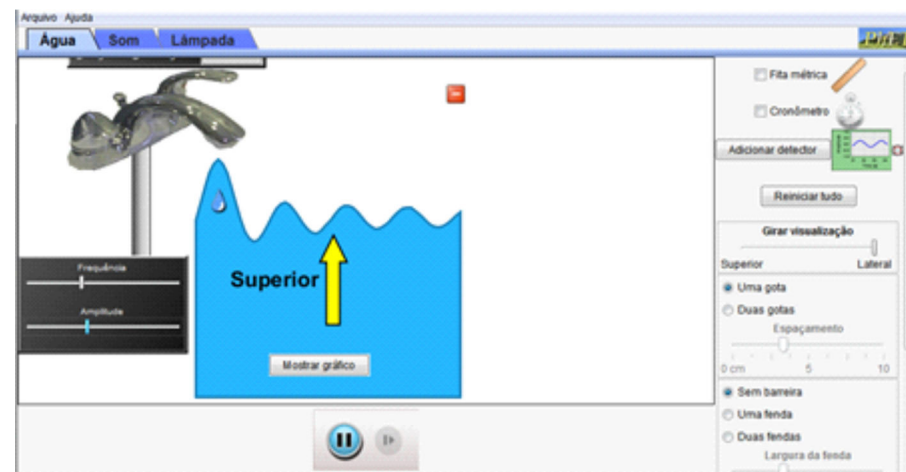
rão explorados todos os seus recursos, que serão utilizados ao longo das aulas.

Figura 19 - Simulação Interferência de Ondas – (A) Ondas na água. (B) Som. (C) Luz.



Para cada ambiente apresentado na Figura 19, (A) onda na superfície da água, (B) onda sonora e (C) luz emitida por uma lâmpada, utilize os botões de amplitude e frequência ou comprimento de onda, aprofundando a elucidação de tais grandezas. É possível escolher visualização superior ou lateral da onda, através do botão girar visualização. O uso desse recurso, como na Figura 18, permite melhor esclarecimento sobre o fato da onda na superfície da água ser bidimensional e som e luz serem tridimensionais. Essa diferença é percebida, pois as duas últimas mantêm o mesmo aspecto em ambas as formas de visualização enquanto a onda na água se altera, como poder ser visto comparando as Figuras 19(A) e 20. Além desta observação, também é possível perceber a perda de energia com a propagação da onda na visualização indicada na Figura 20, uma vez que a amplitude da onda vai diminuindo.

**Figura 20 - Visualização lateral da onda na superfície da água na simulação Interferência de Ondas.**



## A velocidade da onda

Para determinar a velocidade de propagação da onda,  $v$ , sugerimos que a análise parta da Equação (4), na qual  $\Delta S$  é o deslocamento da onda no intervalo de tempo  $\Delta t$ .

$$v = \frac{\Delta S}{\Delta t}$$

Considerando que durante o tempo correspondente a um período da onda, seu deslocamento tem o valor de seu comprimento, a Equação (4) pode ser reescrita como

Lembrando a relação entre o período e a frequência da onda, expressa na Equação (3), podemos apresentar a equação da velocidade na forma:

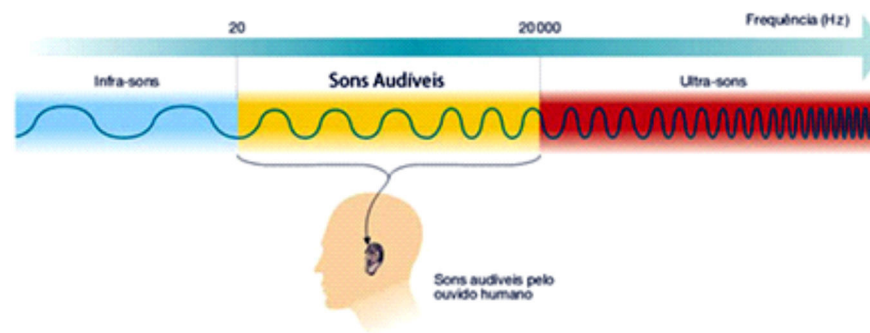
$$v = \frac{\lambda}{T}$$

$$v = \lambda \cdot f$$

A qual é chamada de equação fundamental da ondulatória e relaciona a velocidade  $v$  de propagação da onda com seu comprimento  $\lambda$  e frequência  $f$ .

Sugerimos que sejam apresentados os espectros sonoro e eletromagnético, como os indicados nas Figuras 21 e 22, e a partir deles sejam realizados cálculos usando a equação fundamental tendo em vista a relação de proporcionalidade entre frequência e comprimento de onda para ondas que apresentam a mesma velocidade de propagação.

Figura 21 - Espectro sonoro.

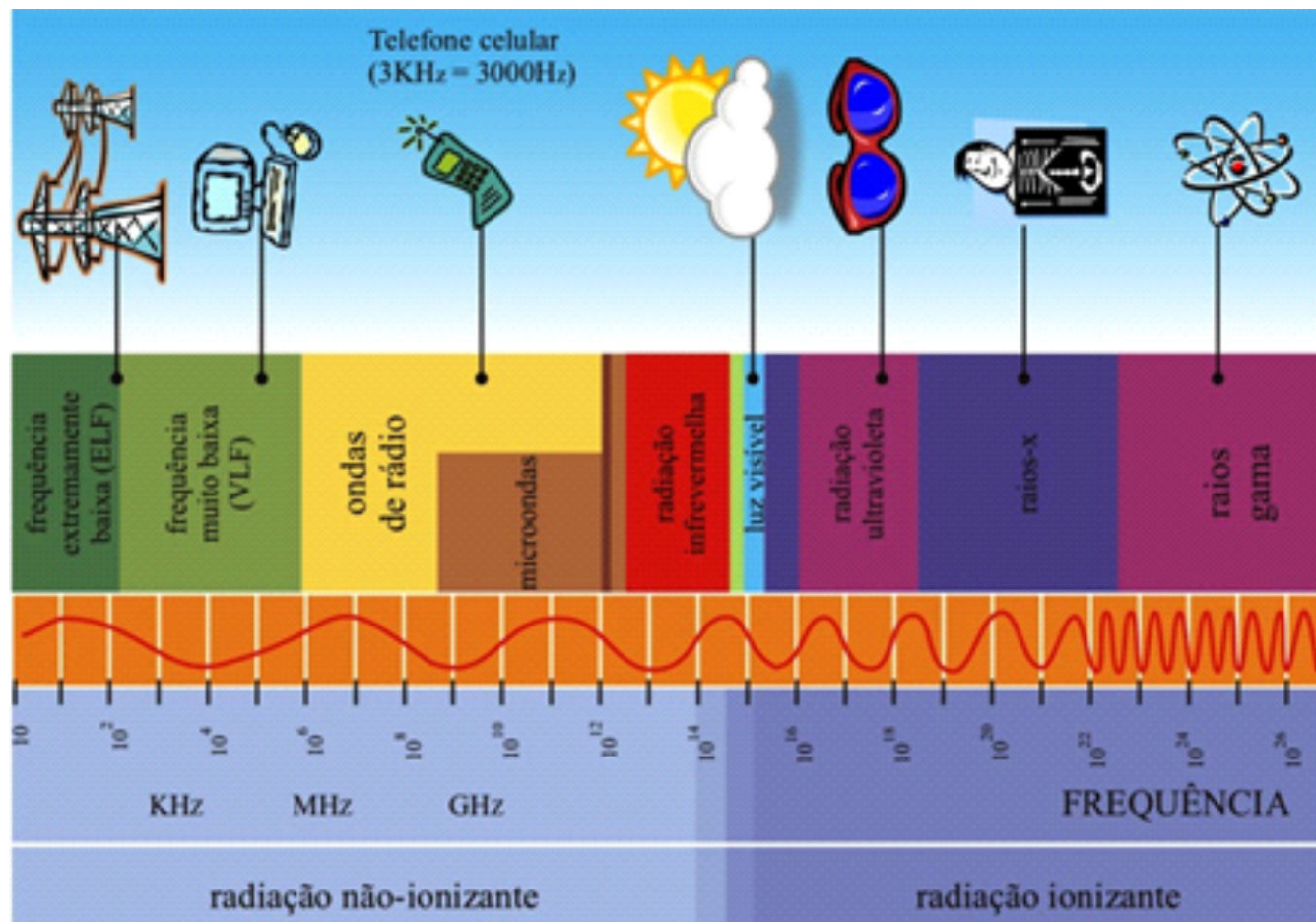


Fonte: [http://www.aulas-fisica-quimica.com/8f\\_07.html](http://www.aulas-fisica-quimica.com/8f_07.html).

Sugerimos que você aponte aplicações para cada faixa dos espectros analisados.

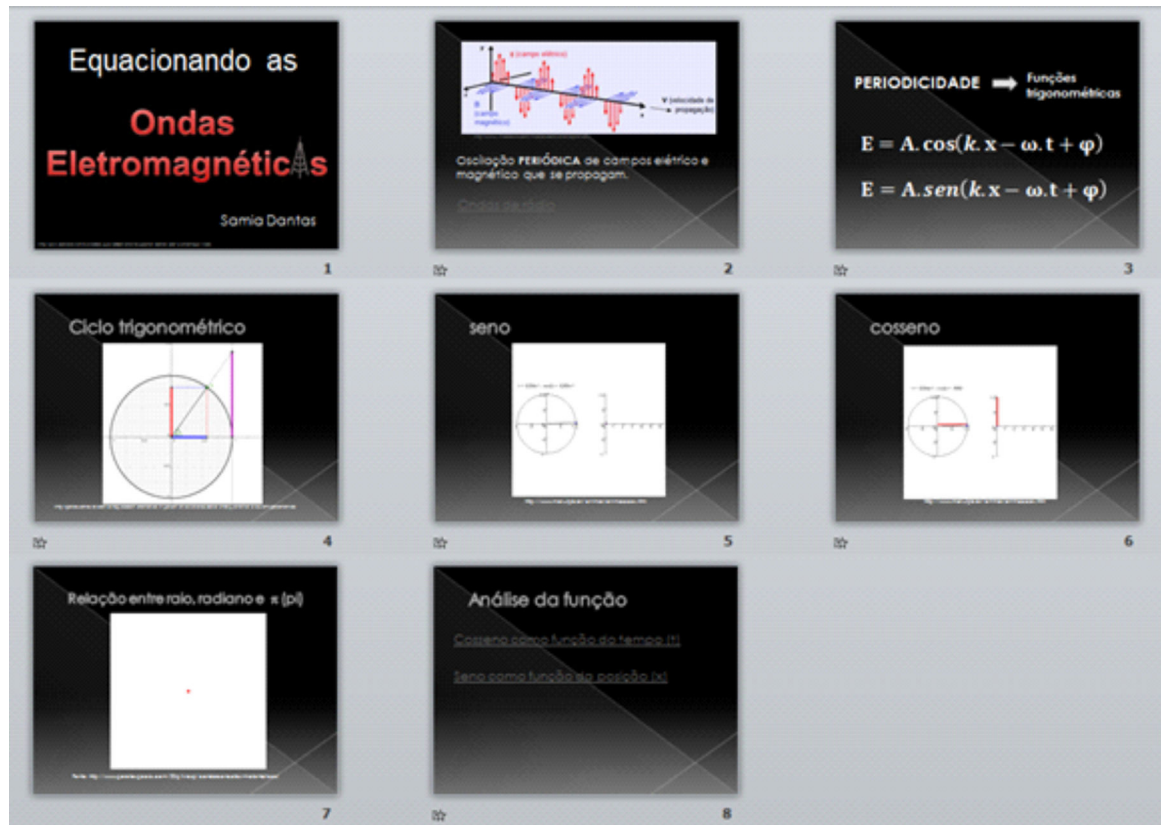
É comum que os estudantes acreditem que todas as radiações sejam ionizantes. Seria interessante, nesse momento, distinguir radiações ionizantes e as não-ionizantes.

Figura 22 - Espectro eletromagnético.



Fonte: <http://portaldoprofessor.mec.gov.br/fichaTecnicaAula.html?aula=28159>.

## Equacionando e modelando matematicamente uma onda eletromagnética



Antes que os alunos usem o software *Modellus* sozinhos, uma sugestão é que seja apresentado a eles o ambiente do mesmo. E, caso não tenham tido nenhum contato com as funções trigonométricas, esse é um bom momento para a apresentação das mesmas. A Figura 23 apresenta sugestão de slides para esta apresentação.

**Figura 23 - Slides da apresentação das funções trigonométricas e do ambiente do software Modellus.**

Fonte: própria da autora.

Para acompanhar a atividade, sugerimos que cada aluno esteja com uma ficha, como a constante na Figura 24. Durante a apresentação em *Power Point*, ou outro software de sua preferência, recomende aos alunos que acompanhem com a ficha e que a completem conforme o andamento das observações.

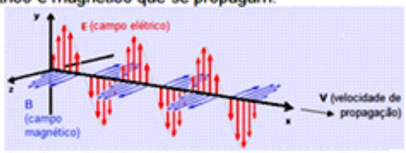
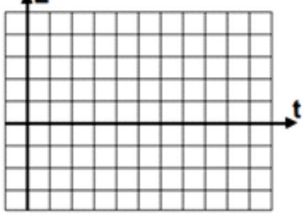
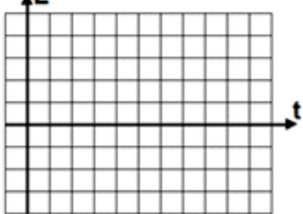
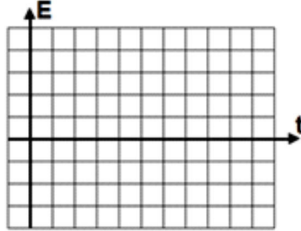
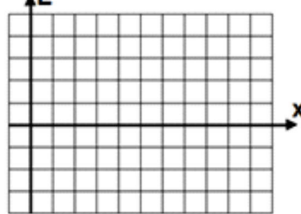
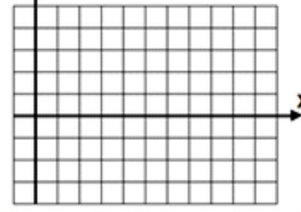
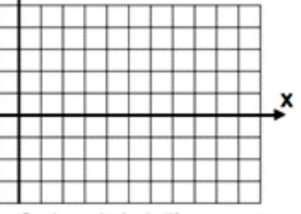
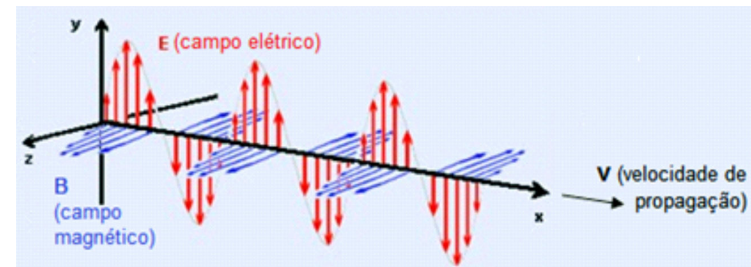
Atividade <b>Uso do software MODELLUS</b>	Disciplina <b>FÍSICA</b>	Professora <b>ΣAMIA</b>	Série/Turma <b>2º</b>	Data <b>/ / 2015</b>
Aluno(a) e número				
<p>1) As ondas eletromagnéticas, representadas na figura abaixo, são formadas pela oscilação periódica de campos elétrico e magnético que se propagam.</p>  <p>Devido à periodicidade desses campos, podemos usar funções trigonométricas para representá-los.</p> <p>Nas equações é possível perceber a propagação no espaço ( ) e a variação no tempo ( ).</p> <p>2) Observação da simulação "ondas de rádio" A propagação da onda no espaço é representada pela enquanto a variação do campo no tempo é ilustrada pelos .</p> <p>3) Primeiro contato com o software Modellus.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Represente</b>, no espaço abaixo, o gráfico gerado pelo software para a equação <math>E = \cos(t)</math>. Identifique a amplitude e o período do gráfico.</li> </ul>  <ul style="list-style-type: none"> <li>• Com a modificação da equação para <math>E = 3 \cdot \cos(t)</math>, repita os passos pedidos acima (representação, amplitude e período).</li> </ul> 				
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Com a modificação da equação para <math>E = 3 \cdot \cos(2t)</math>, repita os passos pedidos anteriormente.</li> </ul>  <ul style="list-style-type: none"> <li>• Agora, faremos a análise da função cosseno em função da posição x. <b>Represente</b>, no espaço abaixo, o gráfico gerado pelo software para a equação <math>E = \sin(x)</math>. Indique a amplitude e o comprimento de onda.</li> </ul>  <ul style="list-style-type: none"> <li>• Com a modificação da equação para <math>E = 3 \cdot \sin(x)</math>, repita os passos pedidos acima.</li> </ul>  <ul style="list-style-type: none"> <li>• Com a modificação da equação para <math>E = 3 \cdot \sin(2x)</math>, repita os passos pedidos anteriormente.</li> </ul>  <ul style="list-style-type: none"> <li>• Qual a principal diferença entre as funções seno e cosseno?</li> </ul>				

Figura 24 - Ficha para acompanhar a apresentação das funções trigonométricas e do software Modellus.

A partir imagem indicada na Figura 25, é possível destacar a periodicidade da onda e que a função para a qual tal periodicidade fica bem representada é uma função trigonométrica.

Figura 25 - Representação dos campos elétrico e magnético de uma onda eletromagnética.



Fonte: <http://www.infoescola.com/fisica/ondas-eletromagneticas/>

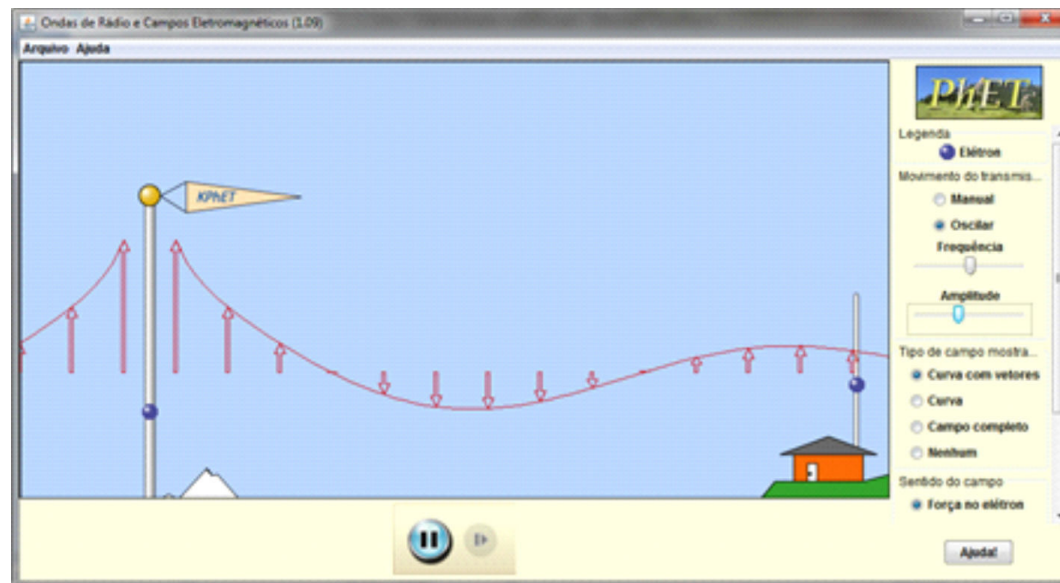
Sabendo que a onda eletromagnética é formada pela oscilação de campos elétrico e magnético e, que ambos apresentam a mesma periodicidade em planos distintos, é suficiente escrever a equação para um deles, neste caso mostramos a equação do campo elétrico  $E$  e do campo magnético  $B$ , que podem ser expressos pelas Equações (7) ou (8)

$$(7) \quad E = A \cos(kx - \omega t + \varphi) \quad (8) \quad B = A' \sin(kx - \omega t + \varphi)$$

Nestas equações,  $A$  e  $A'$  são as amplitudes da oscilação, o termo  $kx$  indica a propagação da onda numa direção do espaço, o termo  $\omega t$  corresponde à oscilação temporal e o termo  $\varphi$  é o que chamamos de fase.

Para melhorar a percepção dos alunos relativa à propagação e oscilação do campo elétrico, sugerimos uma observação da simulação Ondas de Rádio, disponível em [https://phet.colorado.edu/pt\\_BR/simulation/radio-waves](https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/radio-waves), representada na Figura 26.

Figura 26 - Simulação Ondas de Rádio.



Utilizando a simulação na função oscilar e exibindo a curva com vetores, chame a atenção dos alunos para o fato de que a propagação da onda no espaço é representada pela linha enquanto a oscilação do campo em

cada ponto fica a cargo dos vetores.

Caso os alunos não tenham tido contato com as funções trigonométricas será necessário abordar tais funções. E mesmo que já tenham visto, consideramos que vale a pena usar as animações sobre o ciclo trigonométrico, o seno e o cosseno, disponíveis em <http://pensevestibular.com.br/topicosdematematica/trigonometria/seno-cosseno-e-tangente-no-circulo-trigonometrico>, <http://www.mat.ufpb.br/lenimar/animacoes.htm> e <http://www.mat.ufpb.br/lenimar/animacoes.htm> respectivamente, para recapitulação.

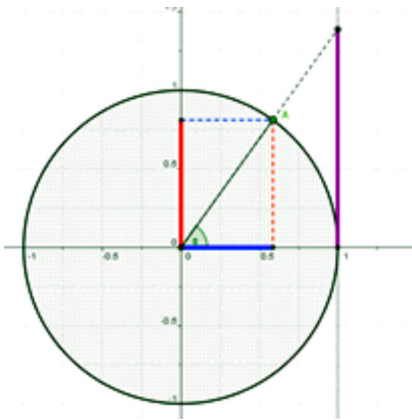


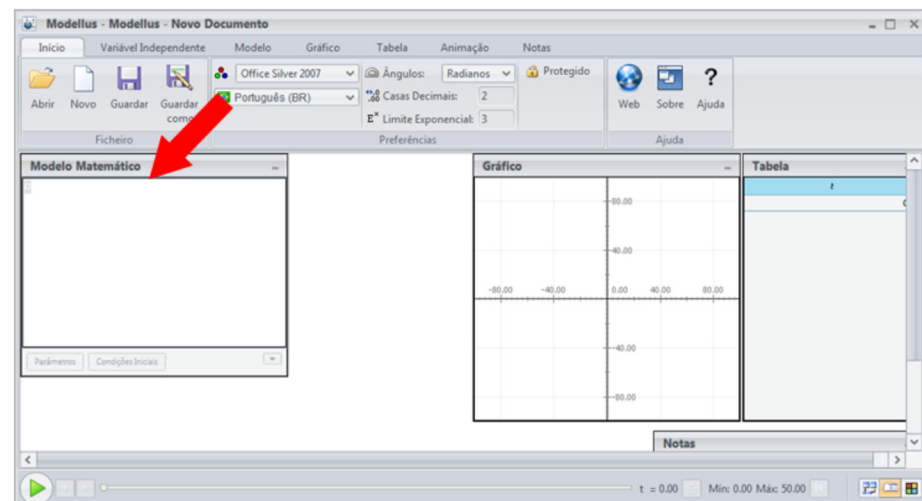
Figura 27 - Animação sobre o ciclo trigonométrico.

A Figura 27 é um *print* da tela da animação sobre o ciclo trigonométrico.

Para mostrar aos alunos o ambiente do software *Modellus*, sugerimos que você apresente análise das funções  $E = \cos(t)$  e  $E = \sin(x)$  e suas variações em amplitude, período e comprimento. Para evitar transtornos, é interessante que você leve os arquivos com as configurações ajustadas, esclarecendo aos alunos que as orientações para tais ajustes serão repassadas a eles quando iniciarem as atividades em grupo.

Figura 28 - Configuração inicial do software Modellus. Destaque para a janela Modelo Matemático.

Ao iniciar o software, sua apresentação será como na Figura 28. As equações são inseridas na janela 'Modelo Matemático' e, para isso, clique dentro da janela e digite a equação considerando os comandos indicados no Quadro 1.



**Quadro 1 - Comandos para inserção de dados na janela Modelo Matemático do software Modellus.**

Comandos do software *Modellus*

Para fazer uma multiplicação clique na barra de espaços.

Para inserir uma fração pressione simultaneamente as teclas **ALT GR** e **Q**.

A função cosseno é identificada automaticamente quando se digita **cos** seguido de parênteses.

A função seno é identificada automaticamente quando se digita **sin** seguido de parênteses.

Para incluir o  $\pi$  escreva **pi** ou clique no botão correspondente na aba 'modelo'.

Para números com casas decimais não utilize vírgula, mas sim ponto.

Não há opção de inserir letras gregas, por isso usaremos L para  $\lambda$  e q para o  $\varphi$ .

Digite  $E = \cos(t)$  na janela modelo matemático. Clique na aba 'Variável Independente', como indica a Figura 29.

**Figura 29 - Aba 'Variável Independente' do software Modellus.**

Verifique que seja  $t$  a variável independente. Esta variável é que aparecerá no eixo horizontal do gráfico. Coloque 8 para valor máximo, 0 para o mínimo e para o passo 0.05. A escolha deste valor máximo fará com que o gráfico seja traçado para valores de  $t$  tais que  $0 \leq t \leq 8$ , e o passo determina qual o intervalo entre os valores da variável independente utilizados nos cálculos.

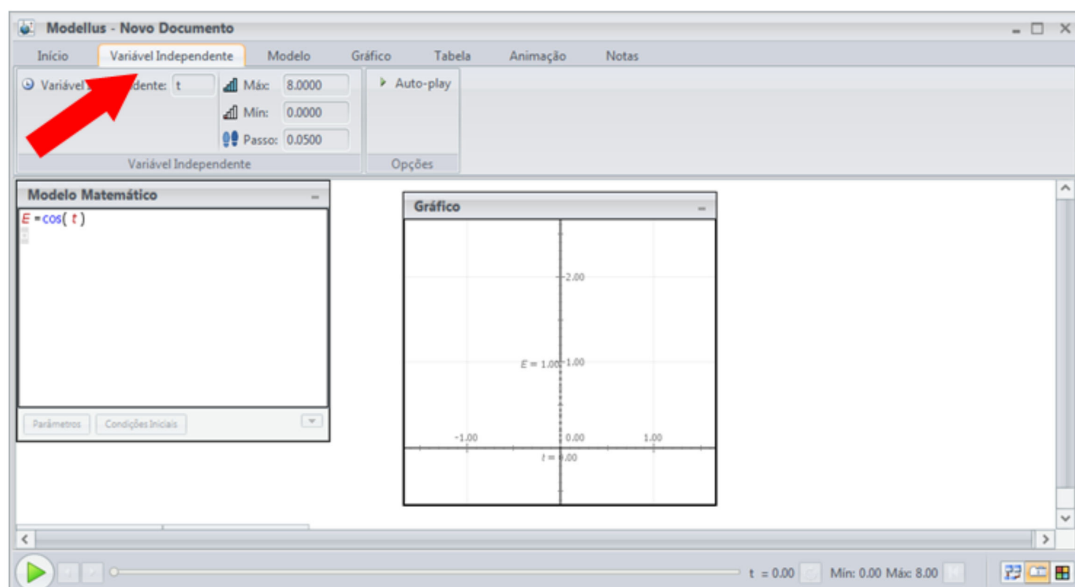
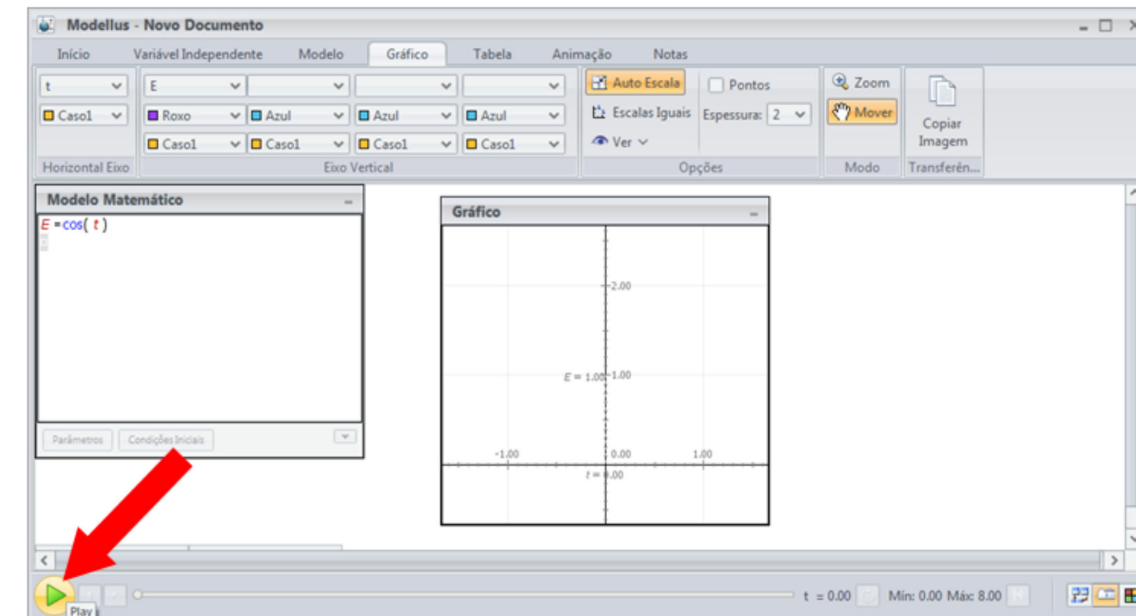
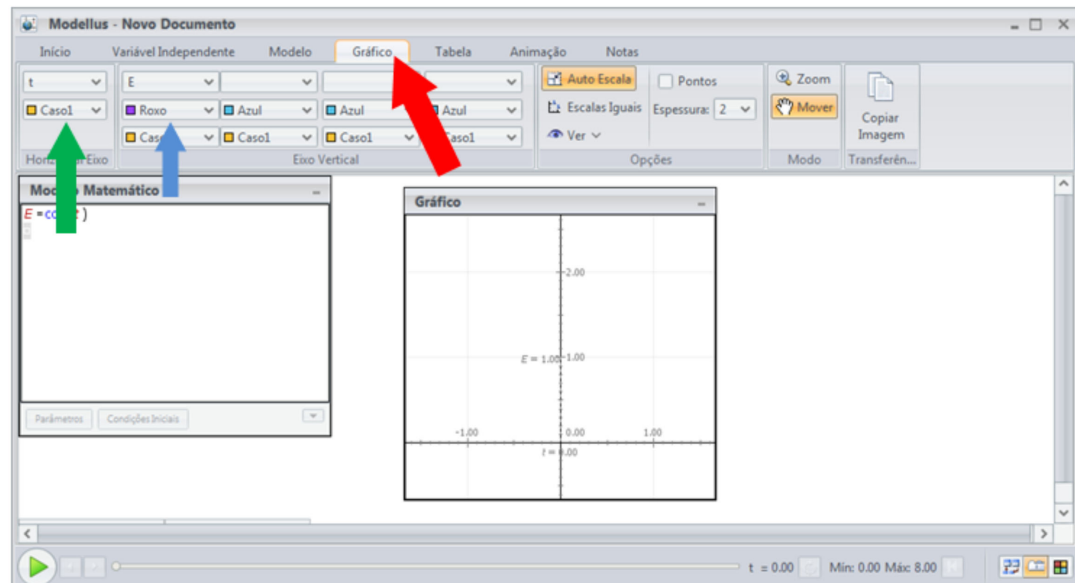


Figura 30 - Aba Gráfico.

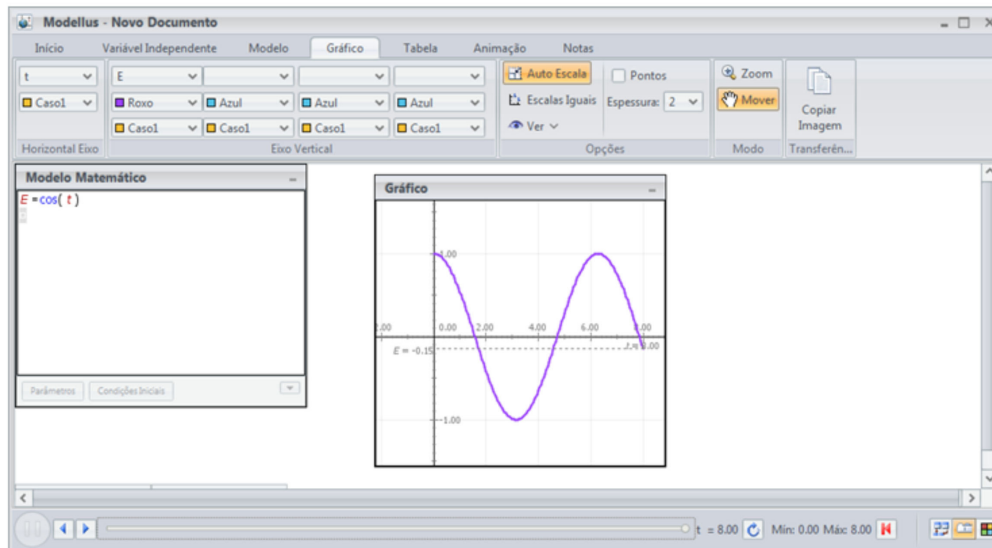
Clique na aba Gráfico, como indica a seta vermelha da Figura 30. Na primeira coluna, indicada por uma seta verde na Figura 30, estará indicada a variável definida no passo anterior como independente. A segunda coluna, marcada por uma seta azul na Figura 30, indicará a variável dependente que aparecerá no eixo vertical do gráfico. Confira que esteja selecionada a opção E e, no botão abaixo, escolha a cor que preferir. Ainda nesta aba selecione a opção “Auto Escala” clicando no botão correspondente. À direita do botão Auto Escala você poderá, se quiser, marcar a opção “Pontos” que fará com que o gráfico seja formado por pontos consecutivos espaçados pelo valor definido na opção “Passo”.



Se a opção Pontos não estiver marcada, o gráfico será traçado em linha contínua. Abaixo desta opção, é possível, para melhor visualização, modificar a espessura da linha.

Figura 31 - Botão play. Clicar na seta inicia a criação do gráfico.

Após a finalização dos ajustes, clique na seta verde indicada na Figura 31 para iniciar a criação do gráfico. O gráfico pronto se apresentará como na Figura 32.



**Figura 32 - Gráfico desenhado pelo software Mo-dellus para a expressão  $E = \cos(t)$  para o intervalo  $0 \leq t \leq 8$ ”.**

Para editar alguma configuração e criar novo gráfico é necessário clicar na seta vermelha no canto inferior direito, como mostra a Figura 32. Recomendamos que estas configurações sejam salvas. Neste caso, ao abrir o arquivo para apresentar aos alunos, você só precisará clicar na seta verde (ver Figura 31) para criar o gráfico.

Antes de iniciar a apresentação dos gráficos, você pode discutir com os alunos que aquelas equações admitem uma análise temporal e outra espacial, quer dizer, podemos observar a oscilação temporal da intensidade do campo em um ponto do espaço ou sua propagação no espaço para um instante fixo de tempo. Seria possível fazer a análise simultânea de ambas as variáveis, mas isso iria além da análise matemática que pretendemos aqui. A análise temporal é feita quando consideramos o tempo ( $t$ ) como variável independente e quando esta variável é o  $x$ , a análise é espacial.

Criando o primeiro gráfico, os estudantes poderão preencher o primeiro item da Atividade 3 da ficha apresentada na Figura 24. Este item pede que eles identifiquem a amplitude e o período no gráfico. É comum, neste momento, que os alunos queiram identificar o período como comprimento de onda, pois têm um pouco de dificuldade de considerar que o gráfico representa a evolução temporal do campo e que aquela distância corresponde na verdade a um intervalo de tempo.

Antes de alterar as configurações para gerar o gráfico pedido no próximo item da atividade, desfaça o gráfico na seta vermelha no canto inferior direito da janela.

Altere a equação da janela modelo matemático para  $E=3 \cos(t)$ , como na Figura 33 (A). Lembre-se que para inserir o sinal de multiplicação é preciso apertar a barra de espaços, como especificado no Quadro 1. Caso não seja usado o espaço para o sinal de multiplicação ficará uma falha no modelo, como indicado na Figura 33 (B) e não será criado gráfico.

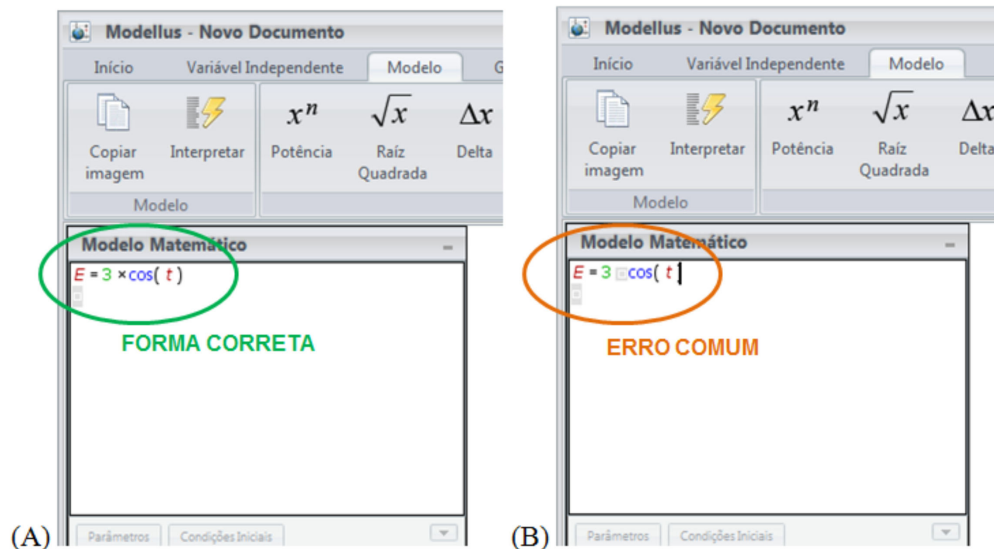
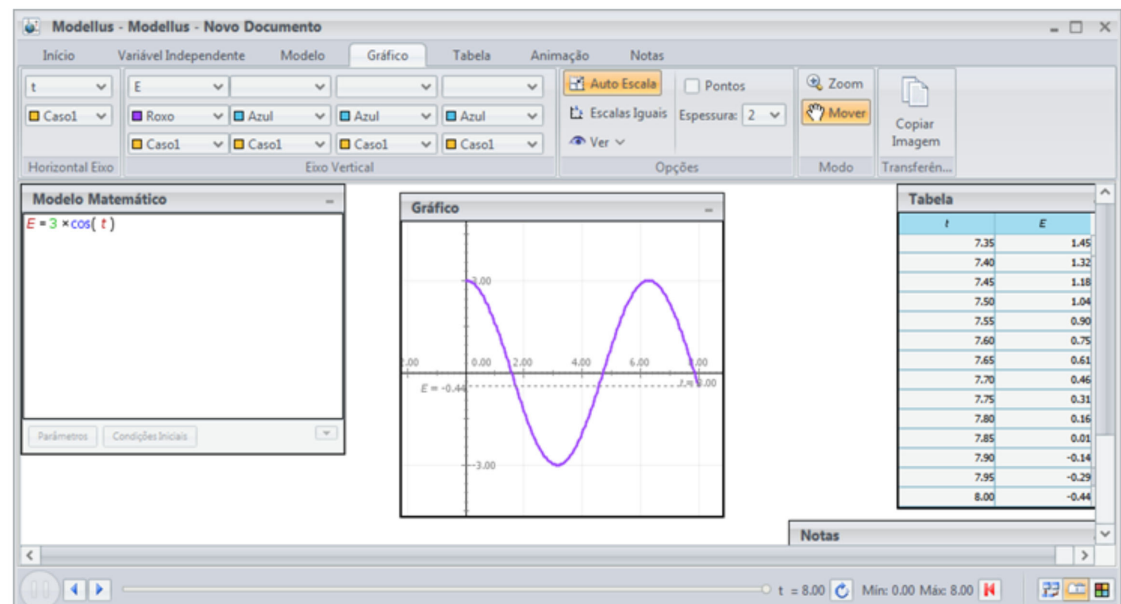


Figura 33 - Forma correta e erro comum ao inserir a equação na janela modelo matemático

Clique na seta para criar o gráfico, que deverá ficar como na Figura 34. Novamente, solicite aos alunos que representem o gráfico formado na ficha e identifique a amplitude e o período do mesmo. Seria interessante se, antes dos alunos desenharem, você pedisse que mantivessem a mesma escala em todos os gráficos, a fim de facilitar a comparação.

Figura 34 - Gráfico gerado para a expressão  $E = 3 \cos(t)$ .

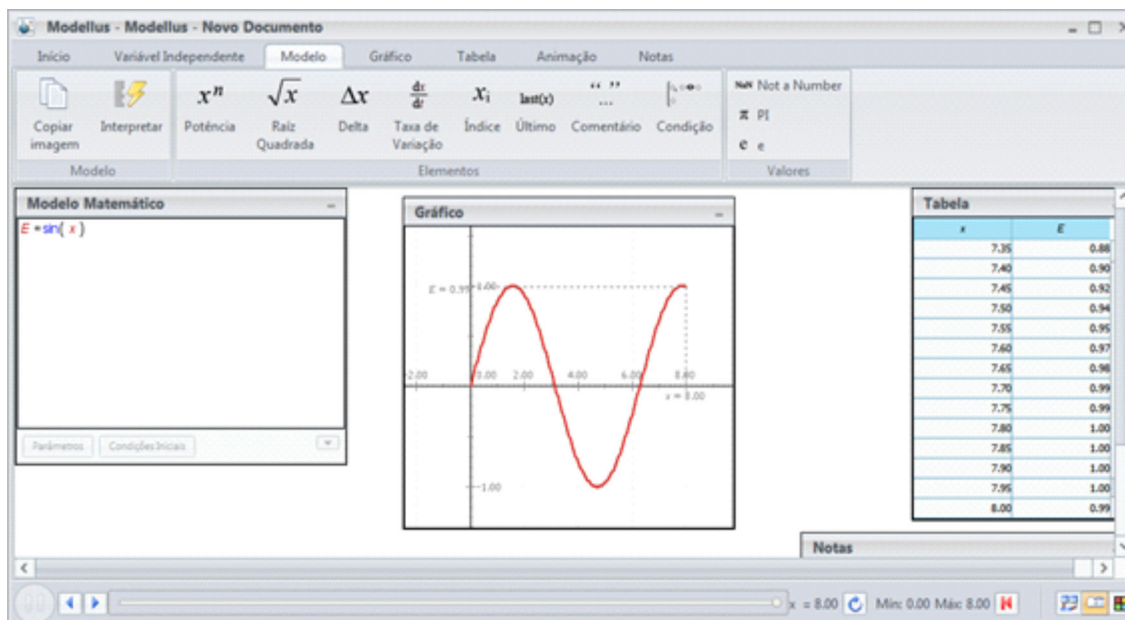
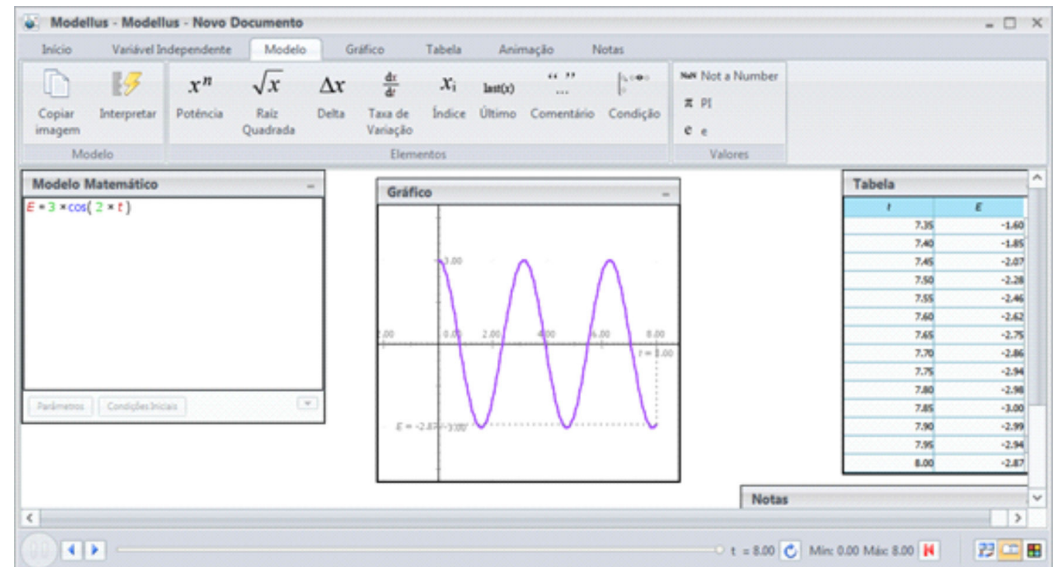
Para realizar a atividade pedida no terceiro item, é necessário desfazer o gráfico novamente antes de alterar a equação, que passa para  $E = 3 \cos(2t)$ . O procedimento também requer atenção para o sinal de multiplicação que deve ser feito pressionando a barra de espaços. O novo gráfico ficará como o



apresentado na Figura 35. Da mesma forma que nos anteriores, peça aos alunos que desenhem o gráfico e determinem amplitude e período do mesmo.

**Figura 35 - Gráfico gerado para a expressão  $E = 3 \cos(2t)$ .**

A seguir passe para a análise da função seno. Esclareça aos alunos que nestas atividades será considerada a propagação no espaço e por isso a variável independente passa a ser  $x$ . Na janela modelo matemático insira a equação  $E = \sin(x)$ . Verifique a aba Variável Independente, como na Figura 26, mas desta vez a variável deve ser  $x$ , o valor de máximo 8, o mínimo 0 (o gráfico será construído para o intervalo  $0 \leq x \leq 8$ ) e o passo 0.05. De forma análoga àquela apresentada na Figura 30, ajuste os dados na aba 'Gráfico' e clique para que o gráfico seja desenhado. O mesmo será como o apresentado na Figura 36.



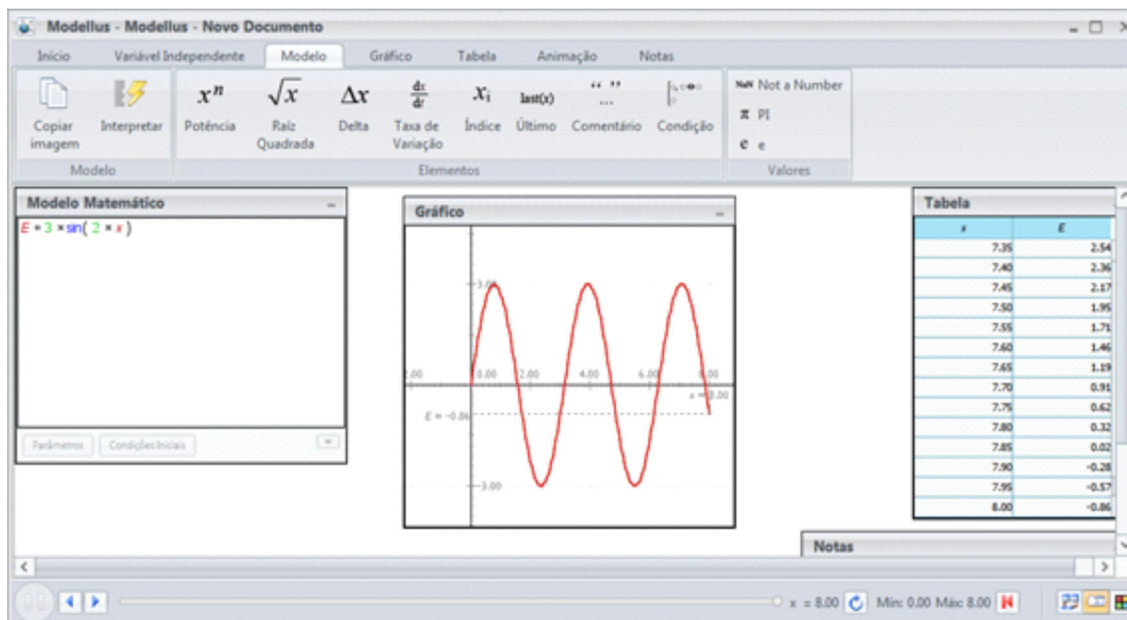
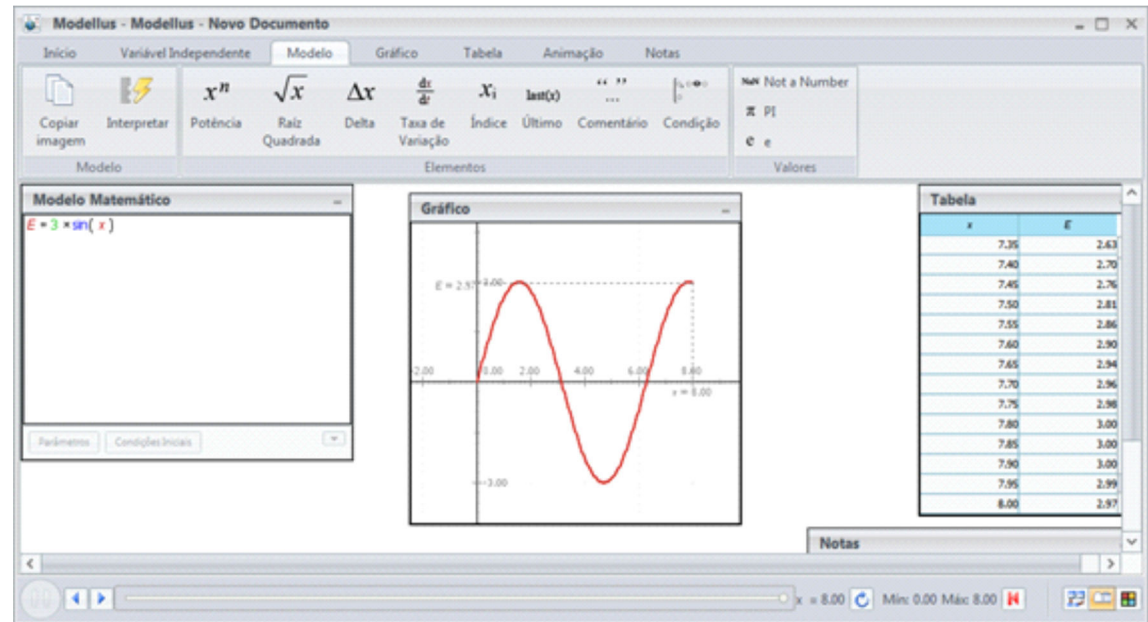
**Figura 36 - Gráfico gerado pelo software Modelus para a equação  $E = \sin(x)$ .**

Ao pedir que os alunos representem a figura na ficha e identifiquem a amplitude e o comprimento de onda, enfatize que o valor relativo ao eixo horizontal se trata de uma distância neste caso. Apague o gráfico, altere a equação para  $E = 3\sin(x)$  e gere novo gráfico, conforme o roteiro. Peça que os alunos re-

pitam os procedimentos de anotação das imagens e identificação da amplitude e do comprimento de onda. O gráfico gerado ficará como o apresentado na Figura 37.

**Figura 37 - Gráfico gerado pelo software Modellus para a equação  $E=3\sin(x)$ .**

Como última alteração nesta atividade, gere o gráfico da equação  $E = 3 \sin(2x)$ , que terá o aspecto mostrado na Figura 38.



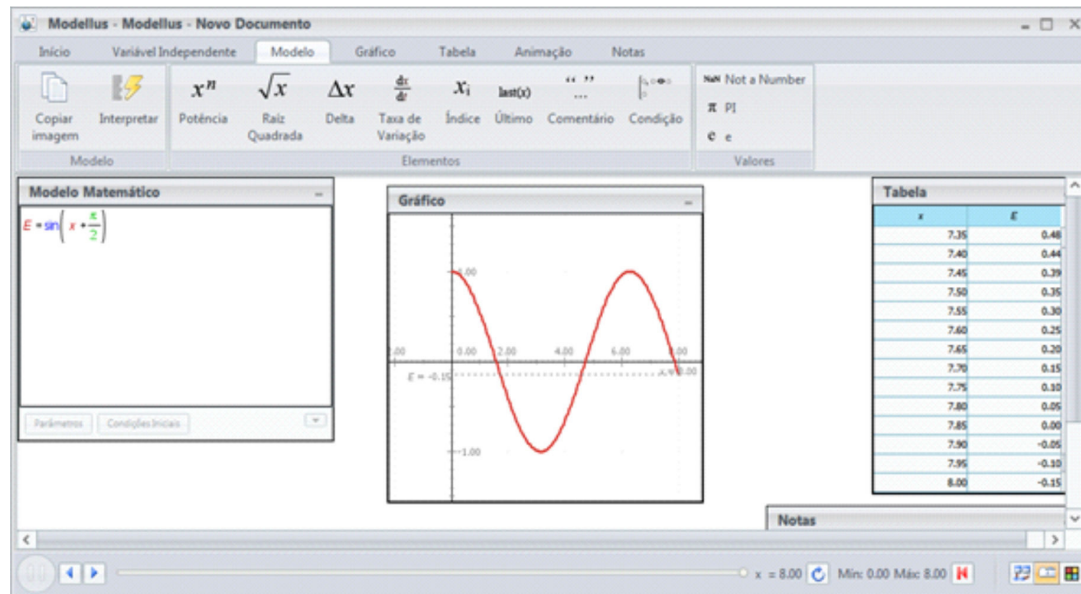
**Figura 38 - Gráfico gerado pelo software Modellus para a equação  $E=3\sin(2x)$ .**

Peça aos estudantes que, comparando os gráficos gerados indiquem as semelhanças e as diferenças entre os gráficos criados com a função seno e a função cosseno. Espera-se que eles percebam que a modificação no coeficiente das funções altera seus valores de am-

plitude e, também, que alterando o argumento, seu período ou comprimento de onda é alterado. Essas mudanças são semelhantes em ambas as funções. Talvez os alunos não consigam expressar claramente a diferença entre as funções, nesse caso, leve-os a perceber que os gráficos iniciam em posições diferentes e permanecem não-coincidentes. Saliente a eles que, para essa situação, dizemos que esta diferença está na fase. Mostre aos alunos que é possível reproduzir o aspecto do gráfico obtido com o cosseno, mostrado na Figura 32 usando o seno e aumentando o argumento em  $\pi/2$ , o que corresponde a um quarto do período ou comprimento de onda e que esta é a defasagem entre as funções. Este gráfico com a fase alterada está indicado na Figura 39.

**Figura 39 - Gráfico criado com a equação  $E = \sin(x + \pi/2)$  e de aspecto semelhante àquele gerado com a equação  $E = \cos(t)$ .**

Para a próxima atividade os alunos devem se organizar em pequenos grupos. Cada grupo deve ter acesso a um computador no qual esteja instalado o *software* *Modellus* e um roteiro de atividades, como aquele mostrado na Figura 40. Recomendamos que você realize todas as atividades antes de repassá-las aos alunos.



<b>1ª Atividade com software MODELLUS</b> <b>Elementos da Onda Eletromagnética</b>	Disciplina <b>FÍSICA</b>	Professora <b>ΣAMIA</b>	Série / Turma <b>2º</b>	Data / / 2015
---	-----------------------------	----------------------------	----------------------------	------------------

Alunos (as) e números

1) Vimos que devido à sua periodicidade, as ondas eletromagnéticas podem ser descritas por funções trigonométricas como  $E = A \cdot \cos(k \cdot x - \omega \cdot t + \phi)$  que fornece o campo elétrico da onda (medido em V/m) se propagando no espaço e periódica no tempo. Focando a análise na propagação espacial da onda em um instante fixo ( $t=0$ ), escolhendo o cosseno e substituindo o número de onda ( $k$ ) por  $2\pi/\lambda$ , temos a equação:

$$E = A \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot x + \phi\right)$$

Na janela "Modelo Matemático" do software *Modellus*, insira a equação do campo elétrico da onda e os valores a seguir.


$$E = A \cdot \cos\left(2 \cdot \frac{\pi}{L} \cdot x - q\right)$$

A=2  
L=1  
q=0

Comandos do software Modellus  
 Para fazer uma multiplicação clique na barra de espaços.  
 Para inserir uma fração pressione simultaneamente as teclas **ALT GR** e **Q**.  
 A função cosseno é identificada automaticamente quando se digita **cos** seguido de parênteses.  
 A função seno é identificada automaticamente quando se digita **sin** seguido de parênteses.  
 Para incluir o  $\pi$  escreva **pi** ou clique no botão correspondente na aba "modelo".  
 Para números com casas decimais não utilize vírgula, mas sim ponto.  
 Não há opção de inserir letras gregas, por isso usaremos L para  $\lambda$  e q para o  $\phi$ .

Na aba "variável independente" coloque x como variável indicada, coloque 3 para o valor máximo (max), deixe 0 no valor mínimo (min) e coloque 0.05 na opção "passo".

Na aba "gráfico" confira se estão selecionadas as variáveis **x** e **E** marque a opção "auto-escala". Clique em "interpretar" na aba modelo. Dê play (seta verde embaixo à esquerda) e observe o gráfico formado. Desenhe uma representação do gráfico no espaço abaixo. Identifique na figura, o comprimento de onda e a amplitude.



2) Apague o gráfico (seta vermelha embaixo à direita). Na janela "Modelo Matemático" apague a linha digitada A=2 e clique em interpretar. Clique na opção "parâmetros" em baixo e à direita na janela "modelo matemático" e

coloque para os casos 1, 2 e 3 os valores 1, 2 e 3 respectivamente.

Na aba "gráfico" estavam selecionadas as variáveis **x** e **E**, respectivamente, selecione **E** também nas duas colunas seguintes. Para cada coluna de **E** selecione um dos casos 1, 2 e 3 e ajuste cores distintas conforme sua preferência. Clique novamente em "interpretar" e dê play.

O software desenhou quantos gráficos? \_\_\_\_\_

Qual a diferença entre os gráficos desenhados? \_\_\_\_\_

Qual o nome do elemento da onda que corresponde a essa distância? \_\_\_\_\_

Em que parâmetro da equação essa grandeza foi ajustada? \_\_\_\_\_

3) Apague o gráfico novamente. Reescreva a linha A=2 na janela "modelo matemático", apague a linha L=1 e clique em "interpretar".

Na opção "parâmetros" coloque 1, 1.5 e 2 para os valores dos casos 1, 2 e 3 respectivamente. Verifique se, na aba "gráfico" estão indicadas três colunas para **E** e se cada uma corresponde a um dos casos.

O software desenhou \_\_\_\_\_ gráficos, novamente.

Qual a diferença entre os gráficos desenhados? \_\_\_\_\_

Qual o nome do elemento da onda que corresponde a essa distância? \_\_\_\_\_

Em que parâmetro da equação essa grandeza foi modificada? \_\_\_\_\_

4) Apague o gráfico novamente. Reescreva a linha L=1 na janela "modelo matemático", apague a linha q=0 e clique em "interpretar".

Na opção "parâmetros" coloque 0, 1.57 e 3.14 para os valores dos casos 1, 2 e 3 respectivamente. Verifique se, na aba "gráfico" estão indicadas três colunas para **E** e se cada uma corresponde a um dos casos.

O software desenhou \_\_\_\_\_ gráficos.

Qual a diferença entre os gráficos desenhados? \_\_\_\_\_

Essa diferença corresponde à **FASE** da onda e dizemos que as ondas formadas neste caso estão defasadas entre si. Em que parâmetro da equação a fase é modificada? \_\_\_\_\_

5) Espaço destinado à opinião do grupo sobre a atividade realizada nesta aula (se foi de fácil realização ou não, como contribuiu para a compreensão dos elementos da onda, etc).

Figura 40 - Roteiro de atividades sobre os elementos da onda para utilização do software Modellus.

Lembrando-se das orientações apresentadas no Quadro 1, insira a equação e os valores a seguir, na janela modelo matemático, conforme destaca na Figura 41.

$$E = A \cos \left( 2 \frac{\pi}{L} x - q \right)$$

$$A=2$$

$$L=1$$

$$q=0$$

Na aba “Variável Independente” coloque x como variável indicada, coloque 3 para o valor máximo (max), deixe 0 no valor mínimo (min) e coloque 0.05 na opção “passo”, como mostra a Figura 38.

**Figura 41 - Inserção de equações e valores e configuração da variável independente.**

Na aba “Gráfico” confira se estão selecionadas as variáveis x, na primeira coluna, e E na segunda. Selecione a cor que desejar para o gráfico, abaixo de onde está selecionada a variável E, marque a opção “Auto-Escala” e, caso queira, modifique a espessura do gráfico.

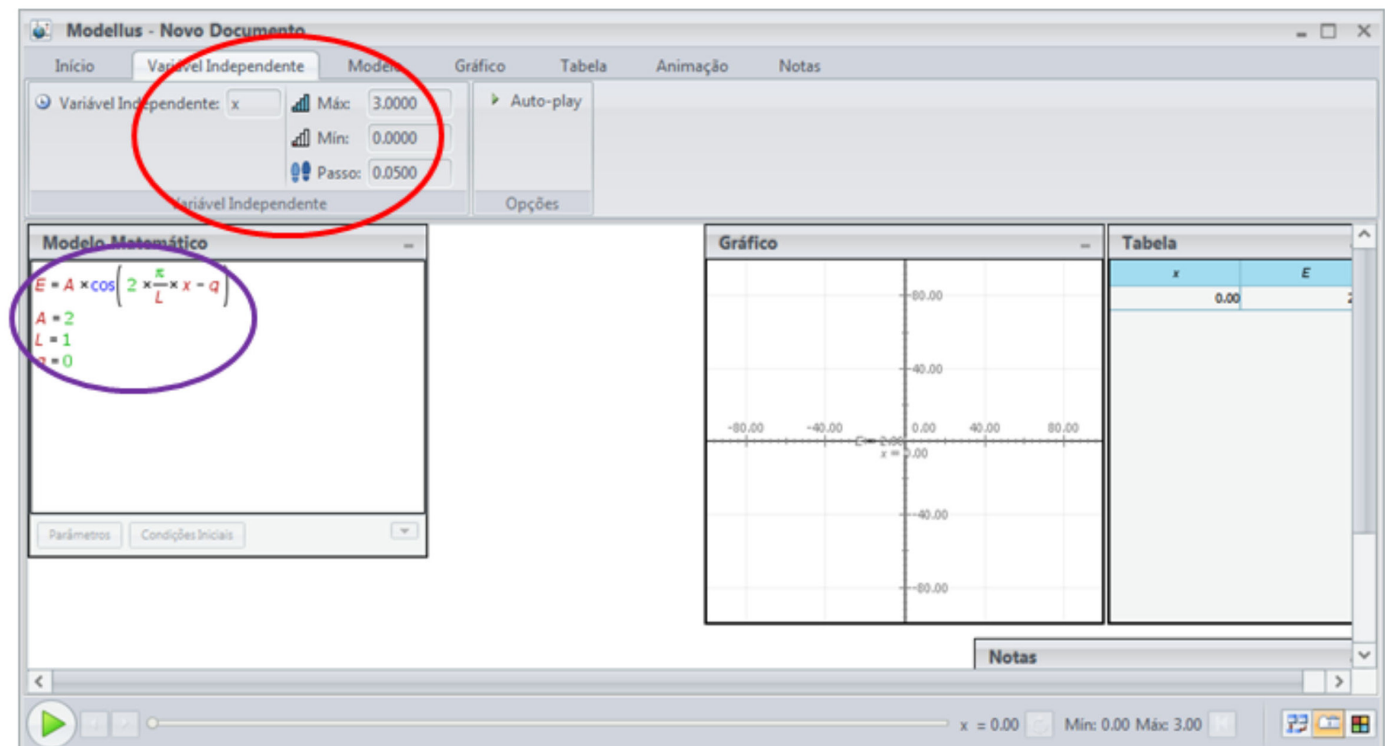


Figura 38 – Ajuste de configurações para criação do gráfico.

Clique em “Interpretar” na aba Modelo – ver Figura 42. Dê *play* e observe que o gráfico formado terá o aspecto apresentado na Figura 42.

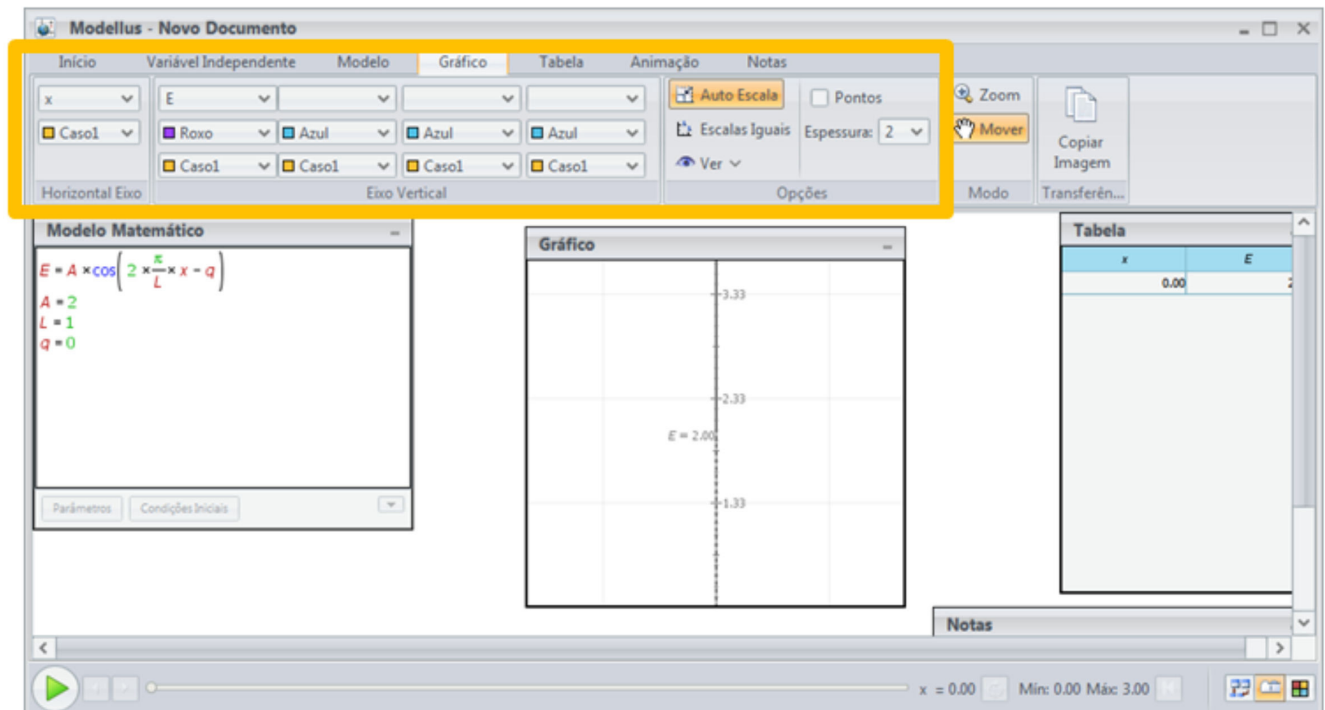
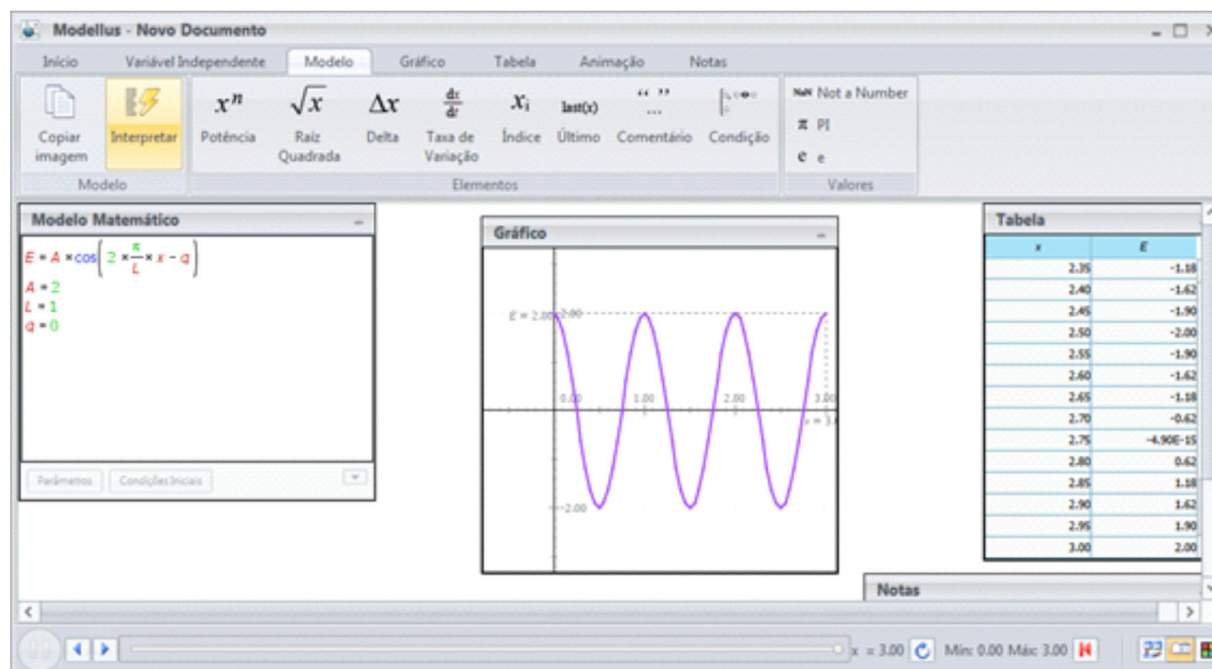


Figura 42 - O botão ‘Interpretar’ no canto superior esquerdo e o gráfico formado.

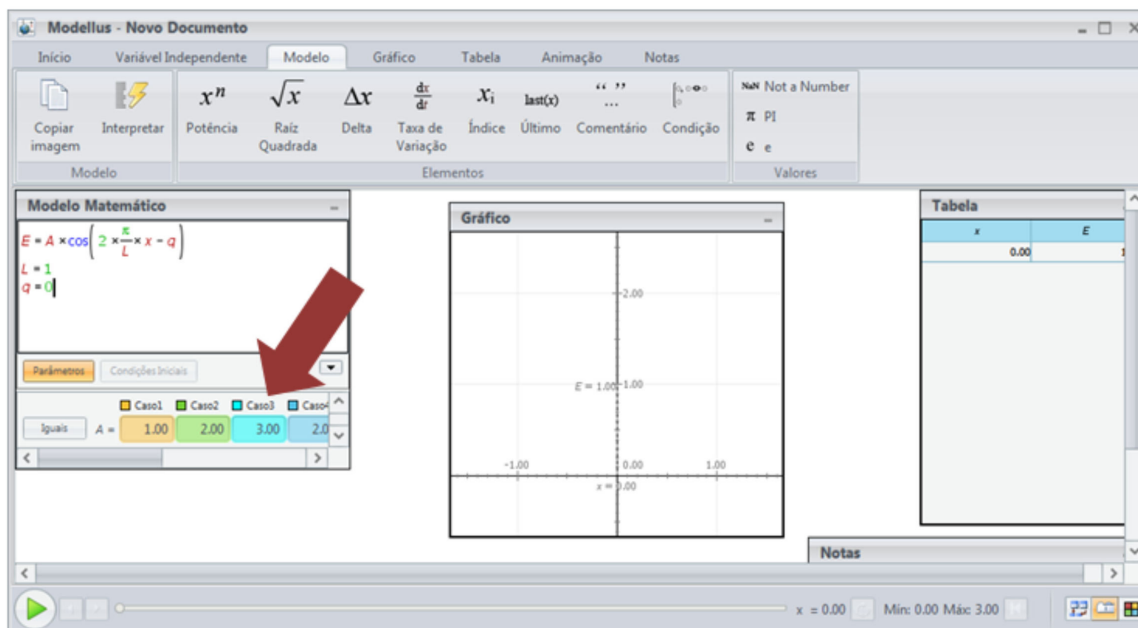
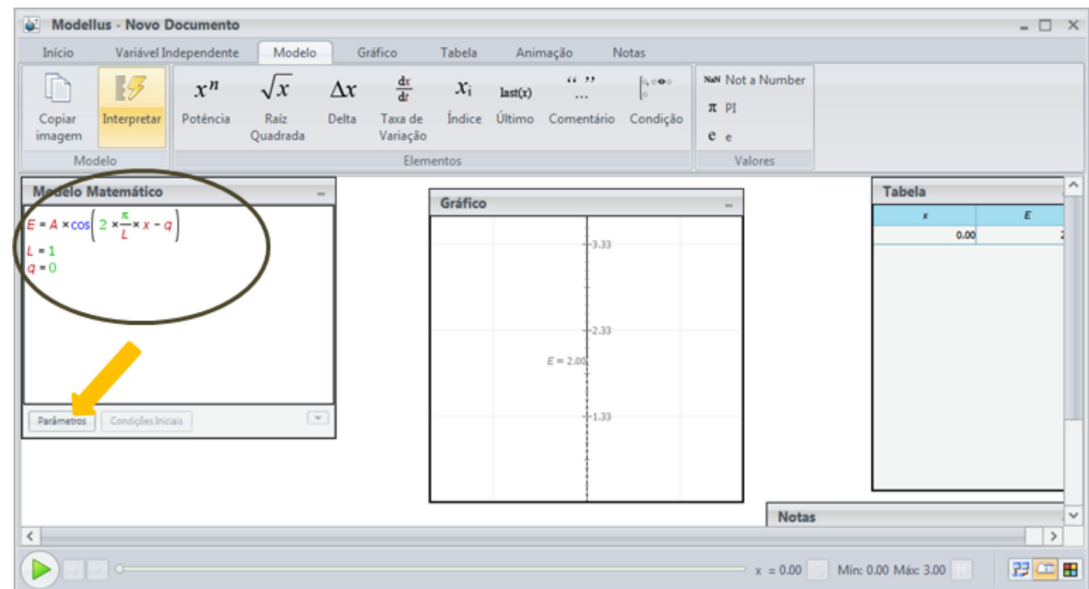
O roteiro pede que os alunos desenhem uma representação do gráfico formado e identifiquem na figura, o comprimento de onda e a amplitude antes de passar para a próxima atividade.



Clique na seta vermelha embaixo e à direita para apagar o gráfico. Na janela modelo matemático apague a linha  $A = 2$  e clique em interpretar, como mostra a Figura 43.

**Figura 43 - Alterações no modelo para criação de novo gráfico.**

Ao realizar estes passos o botão “parâmetros”, indicado pela seta amarela na Figura 43, ficará disponível. Assim, estamos eliminando o valor da amplitude e na opção parâmetros, e poderemos escolher mais de um valor para a grandeza, formando mais de um gráfico.

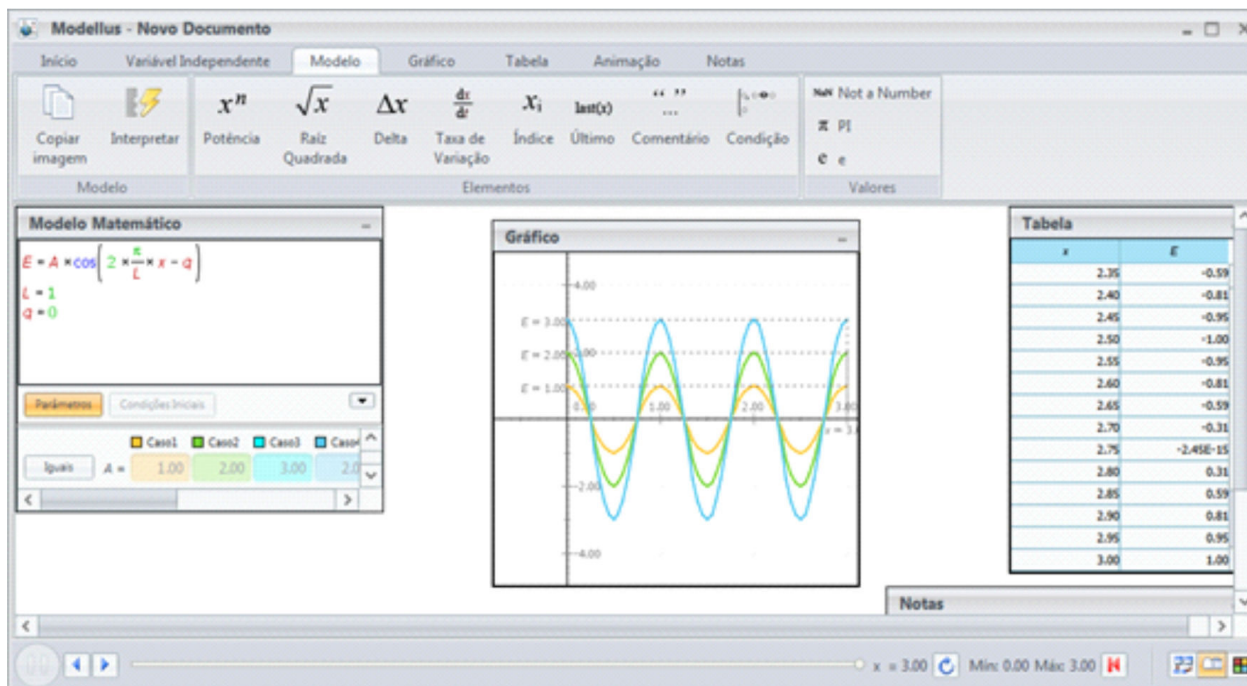
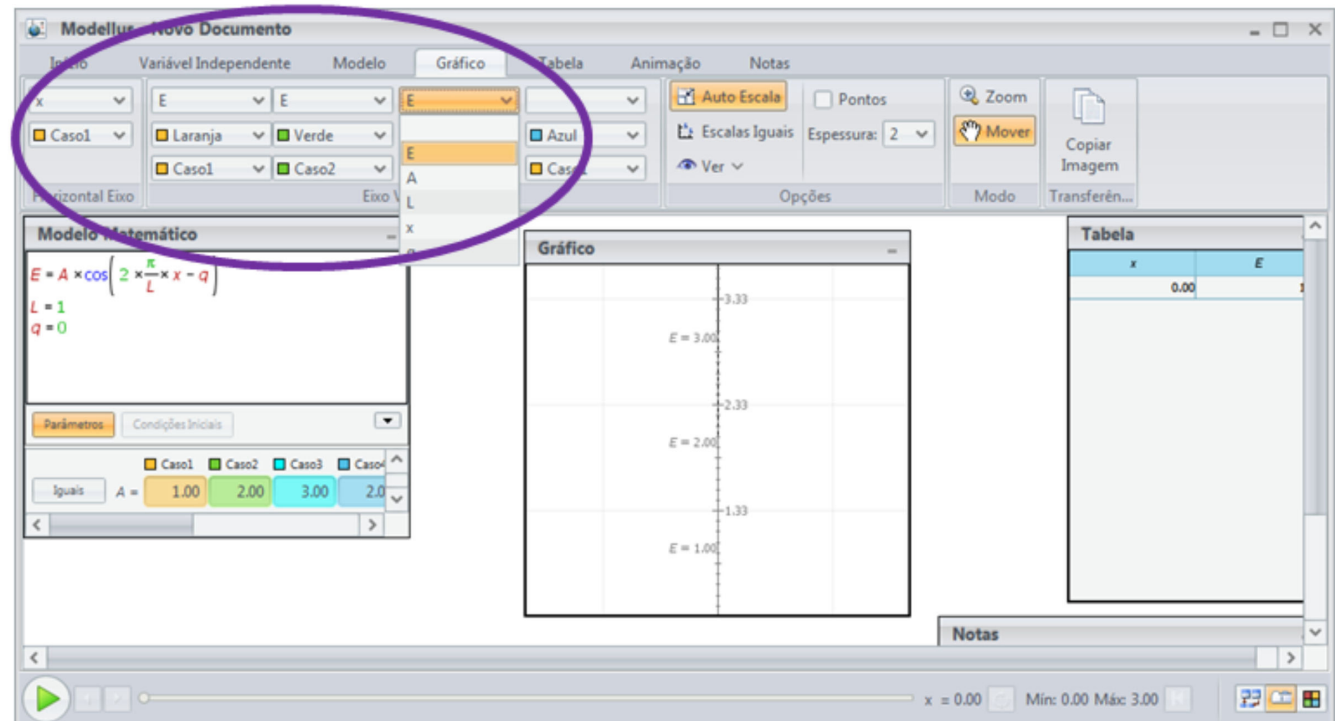


**Figura 44 - Inserção de valores para na opção parâmetros.**

Como indicado na Figura 44, coloque os valores 1, 2 e 3 para os três primeiros casos.

Figura 45 - Selecionando as variáveis dependentes para geração de novos gráficos.

Na aba “Gráfico” já estavam selecionadas as variáveis  $x$  e  $E$  nas duas primeiras colunas, selecione  $E$  também nas duas colunas seguintes, como mostra a Figura 45. Para cada coluna de  $E$  selecione um dos casos 1, 2 e 3 e ajuste cores distintas conforme sua preferência. Clique em “interpretar” na aba modelo e dê



play. Serão criados três gráficos, um para cada caso, como mostra a Figura 46. A diferença entre os gráficos formados é que apresentam amplitudes distintas.

Figura 46 - Gráficos criados com amplitudes diferentes.

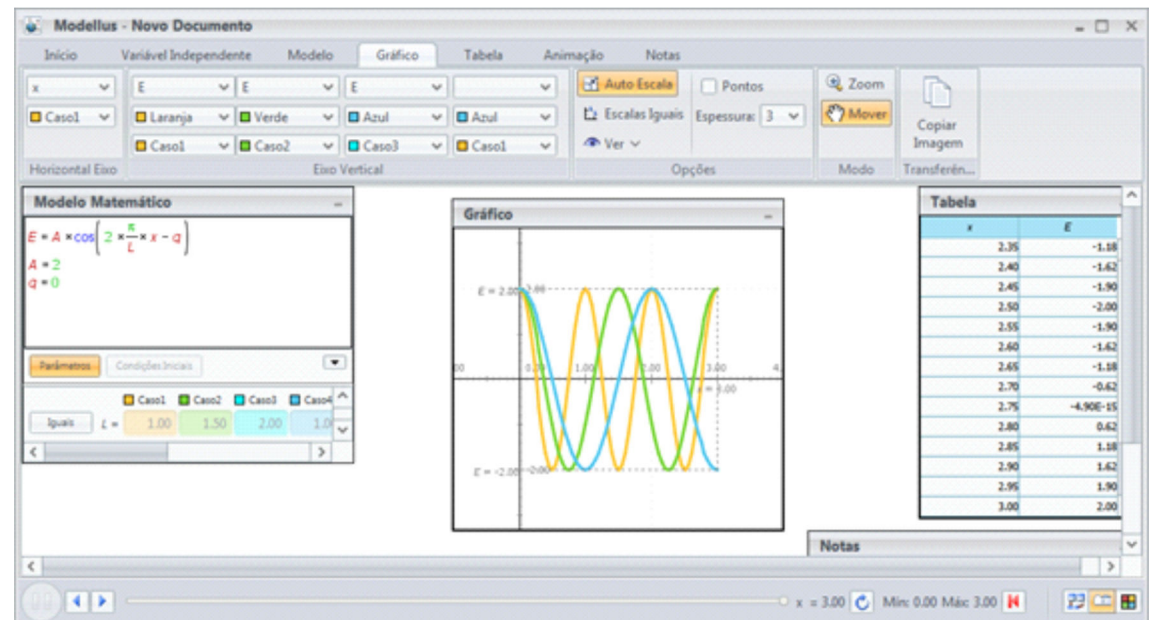
Apague o gráfico novamente. Reescreva a linha  $A=2$  na

janela “modelo matemático”, apague a linha  $L=1$  e clique em “interpretar”.

Na opção “parâmetros” coloque 1, 1.5 e 2 para os valores dos casos 1, 2 e 3 respectivamente. Verifique se, na aba “gráfico”, estão indicadas três colunas para  $E$  e se cada uma corresponde a um dos casos. Clique em interpretar e dê *play*. Os gráficos gerados estão representados na Figura 47.

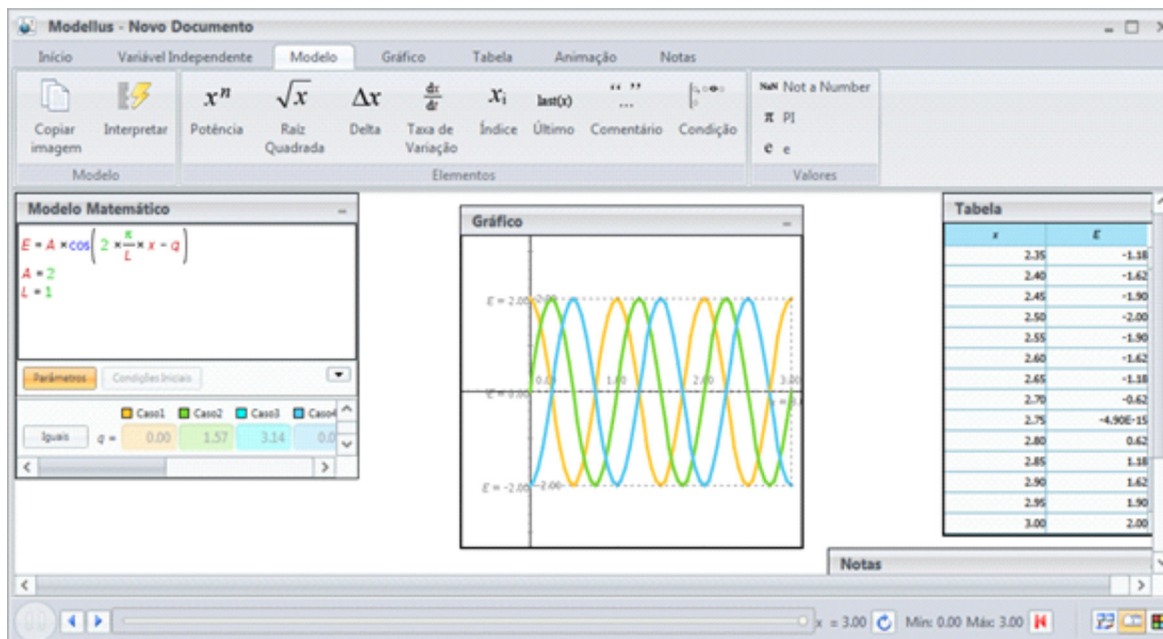
**Figura 47 - Gráficos gerados com comprimentos de onda diferentes.**

A seguir, apague novamente os gráficos. Na janela Modelo Matemático, reescreva a linha  $L=1$  e apague a li-

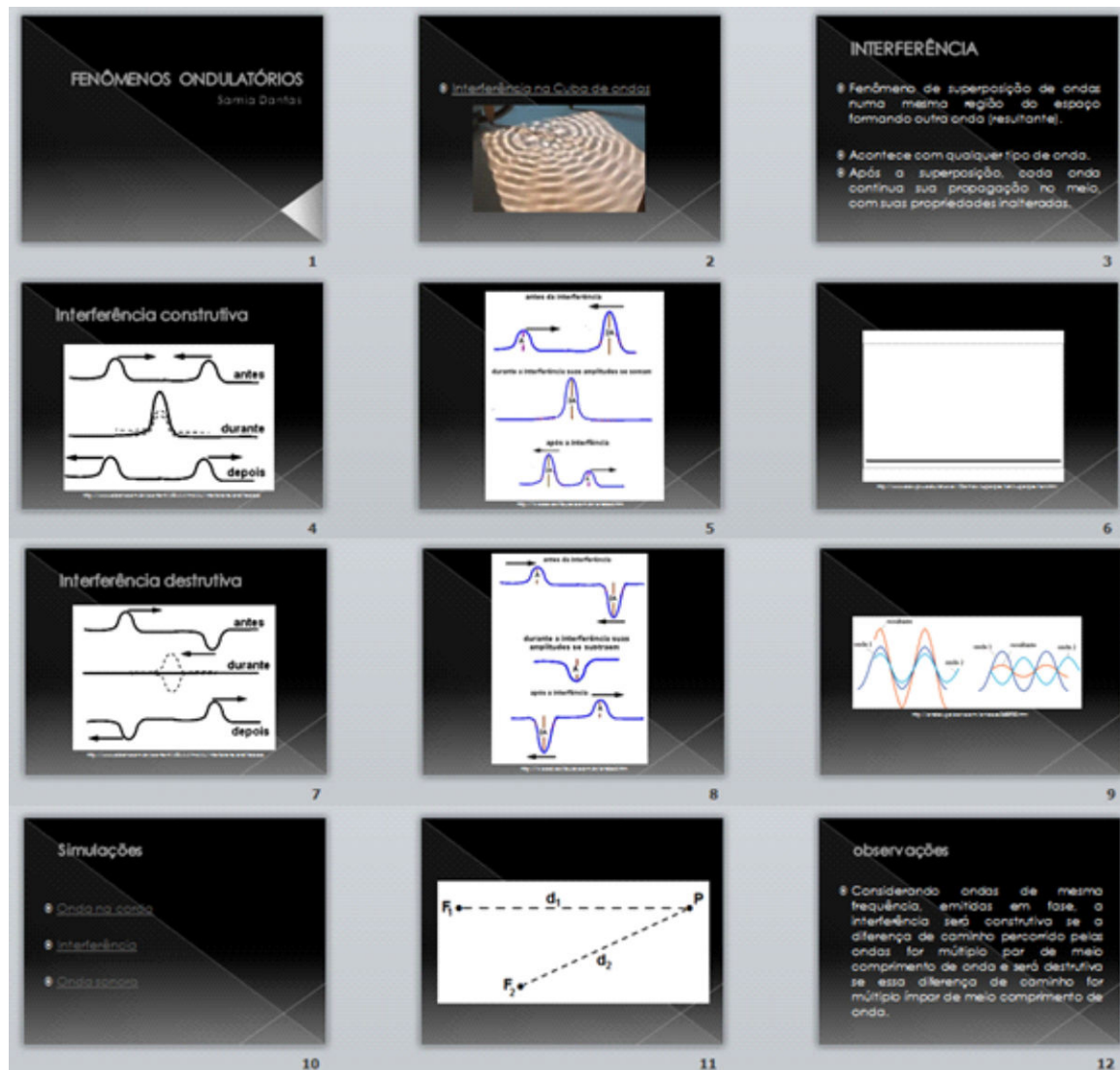


inha  $q=0$  e clique em “interpretar”. Na opção “Parâmetros”, coloque 0, 1.57 e 3.14 para os valores dos casos 1, 2 e 3, respectivamente. Verifique se, na aba “Gráfico” estão indicadas três colunas para  $E$  e se cada uma corresponde a um dos casos. Clique em interpretar e dê *play*. Os gráficos gerados estão representados na Figura 48.

**Figura 48 - Gráficos desenhados pelo software com fases distintas.**



Talvez os estudantes não identifiquem imediatamente a diferença entre os gráficos, sugerimos que você os oriente a observar o ponto inicial do gráfico bem como os demais pontos. Se necessário for, explicita aos alunos que os gráficos diferem entre si na fase, que é o valor da função em cada ponto.



## Interferência de ondas

A Figura 49 mostra sugestão de slides para utilizar na primeira aula sobre interferência.

**Figura 49 - Slides para a primeira aula sobre interferência.**

Fonte: própria autora.

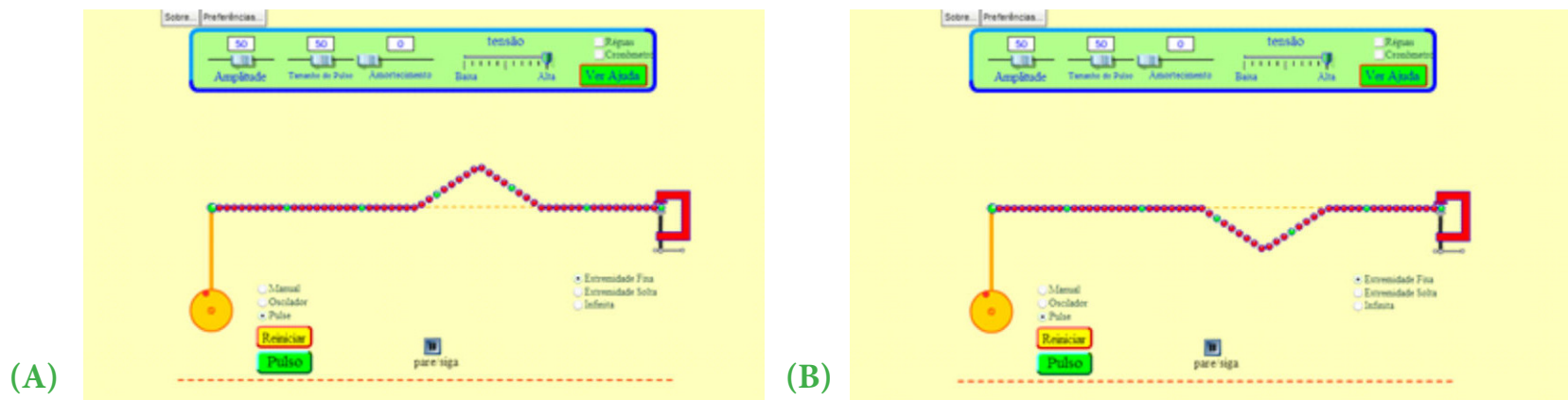
Sugerimos a exibição de um vídeo do experimento de interferência numa cuba de ondas (disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=ORgFE-QQM2w>) para iniciar a discussão sobre interferência. É interessante que a aula seja conduzida incentivando a participação dos alunos.

O slide de número 3, indicado na Figura 49, traz a definição de interferência como superposição de ondas numa mesma região e destaca que a interferência pode acontecer com qualquer tipo de onda. Além disso, esclarece também que após a superposição, cada onda continua sua propagação no meio, com suas propriedades inalteradas.

Os slides 4 e 7 trazem imagens, disponíveis em <http://www.ebah.com.br/content/ABAAfmxIAL/interferencia-difracao> e as imagens sugeridas nos slides 5 e 8 foram extraídos de <http://fisicaevestibular.com.br/ondas4.htm>. Os slides foram organizados desta forma para agrupar as imagens sobre interferência construtiva e destrutiva. No sexto slide, aparece uma animação sobre interferência construtiva, que explicita a condição de que as ondas seguem sem alterações após a sua superposição. O slide de número 9 coloca lado a lado situações de interferência construtiva e destrutiva a partir de imagens disponíveis em <http://ondas.galeon.com/enlaces2683930.html>.

O décimo slide serve de link para as simulações. Inicialmente, sugerimos utilizar novamente a simulação Onda na Corda, mas, desta vez, para mostrar a interferência de dois pulsos. Ao abrir a simulação, configure no modo pulso e no botão amortecimento escolha o valor zero. Clique no botão verde para criar um pulso, como na Figura 50. É interessante discutir com os estudantes que, neste caso, a reflexão do pulso acontece com inversão da fase.

Figura 50 - Pulso criado (A) e pulso refletido (B) com a extremidade fixa.



Crie então outro pulso para que os alunos percebam a interferência. A Figura 51 mostra a interferência entre o pulso refletido na extremidade fixa e aquele gerado posteriormente. Esta interferência é destrutiva uma vez que os pulsos têm fases opostas. Chame a atenção dos alunos para o fato de que após a superposição cada pulso segue sua propagação sem sofrer alteração.

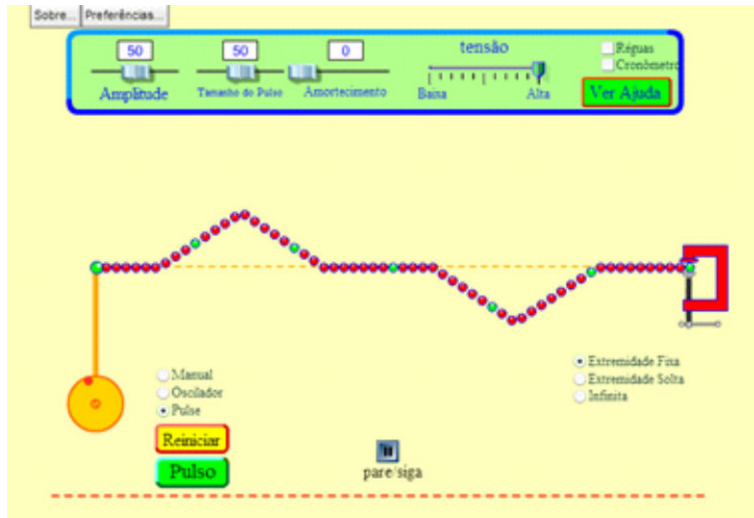
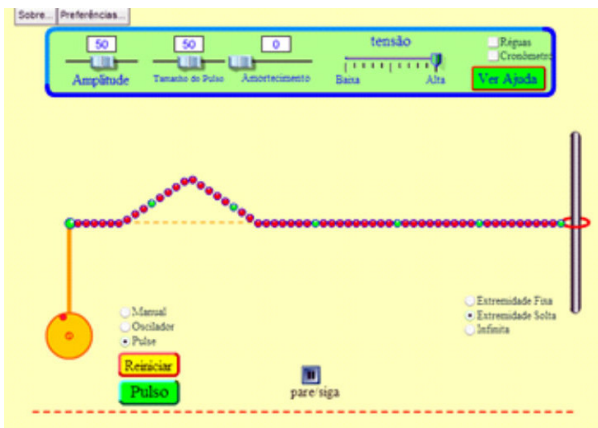


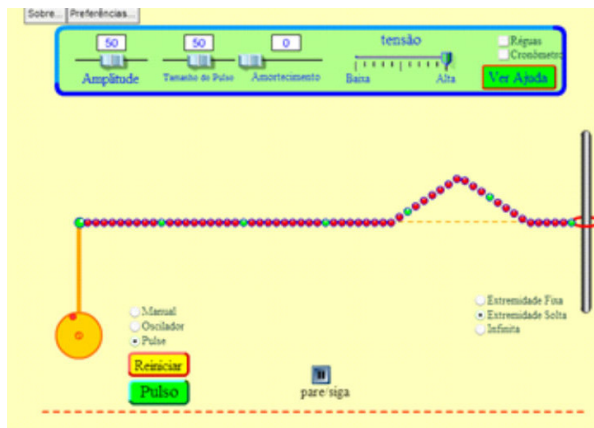
Figura 51 - Pulso refletido e outro pulso gerado que resultarão em interferência destrutiva.

Modifique a configuração do simulador para extremidade solta. Crie um pulso e observe que, neste caso, a reflexão na extremidade solta acontece sem inversão de fase, no entanto na extremidade na qual se encontra o oscilador a fase continua sendo invertida.

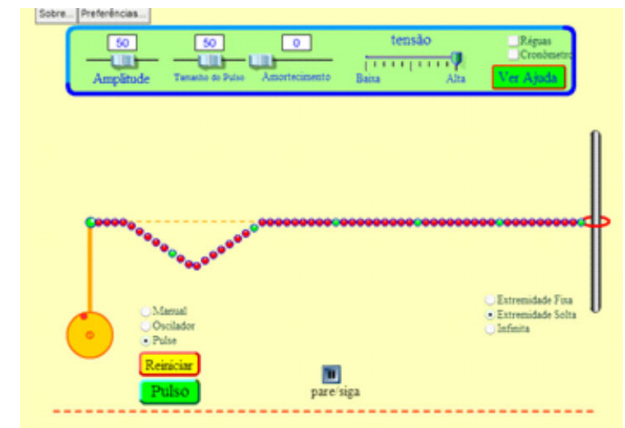
Figura 52 - (A) Pulso gerado. (B) Pulso refletido na extremidade solta. (C) Pulso refletido na extremidade fixa onde se encontra o oscilador.



(A)



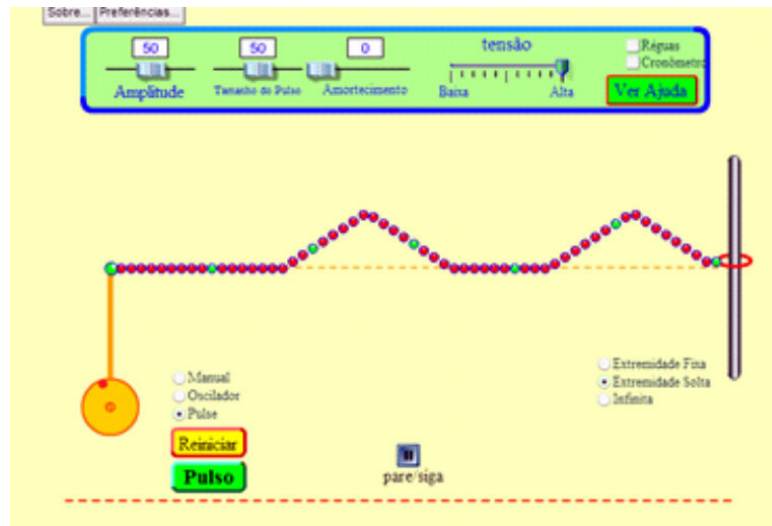
(B)



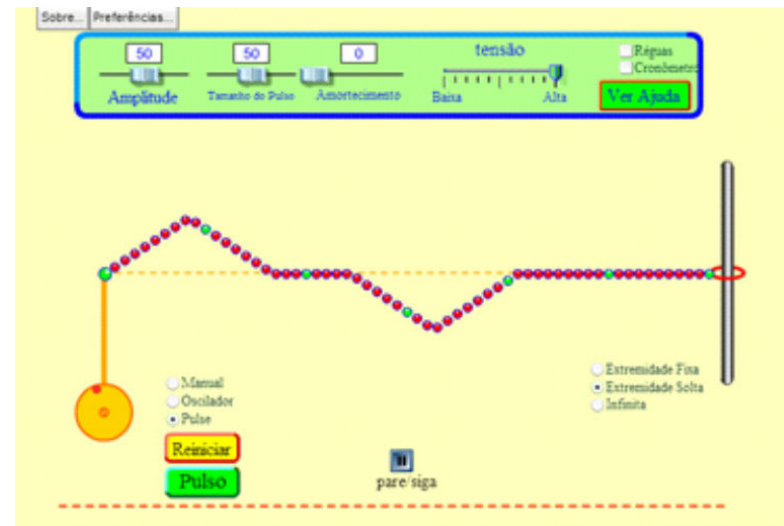
(C)

Crie então outro pulso para que os alunos percebam a interferência. Dependendo do momento em que o segundo pulso for criado, poderá acontecer uma interferência construtiva ou destrutiva, como percebemos nas imagens apresentadas na Figura 53.

Figura 53 - Pulsos que sofrem interferência (A) construtiva e (B) destrutiva.



(A)

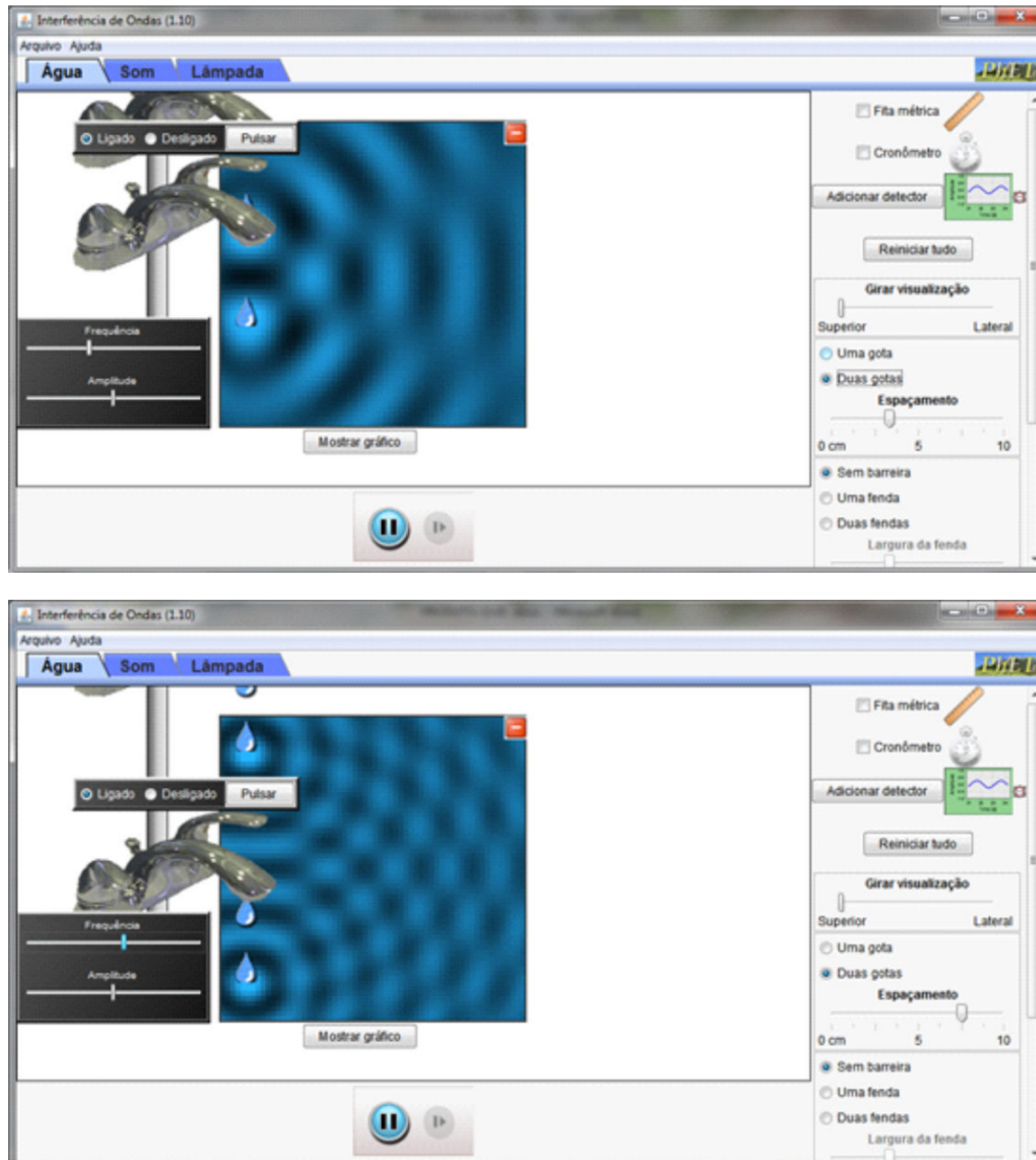


(B)

A seguir, volte a explorar a simulação Interferência de Ondas, já utilizada anteriormente. Na aba que simula ondas na superfície da água, escolha a opção duas gotas. Alguns alunos podem se queixar de que o movimento causa algum desconforto visual. Neste caso, pause a simulação para que os estudantes possam observar as franjas de interferência e discuta com eles em que regiões a interferência é construtiva ou destrutiva. Vá modificando o espaçamento entre as fontes e a frequência com que as gotas caem e observe a modificação na figura de interferência formada. A Figura 54 apresenta duas configurações dessa interferência.

Passando para a aba que simula a luz escolha a opção *two lights* e repita os passos realizados com as ondas na superfície da água. Na Figura 55, está representada como seria vista a interferência entre duas fontes de luz vermelha projetada na parede, considerando que sejam as únicas fontes de luz disponíveis no local e que fossem emitidas em fase.

Figura 54 - Figuras de interferência na superfície da água com diferentes espaçamentos entre as fontes e frequência.



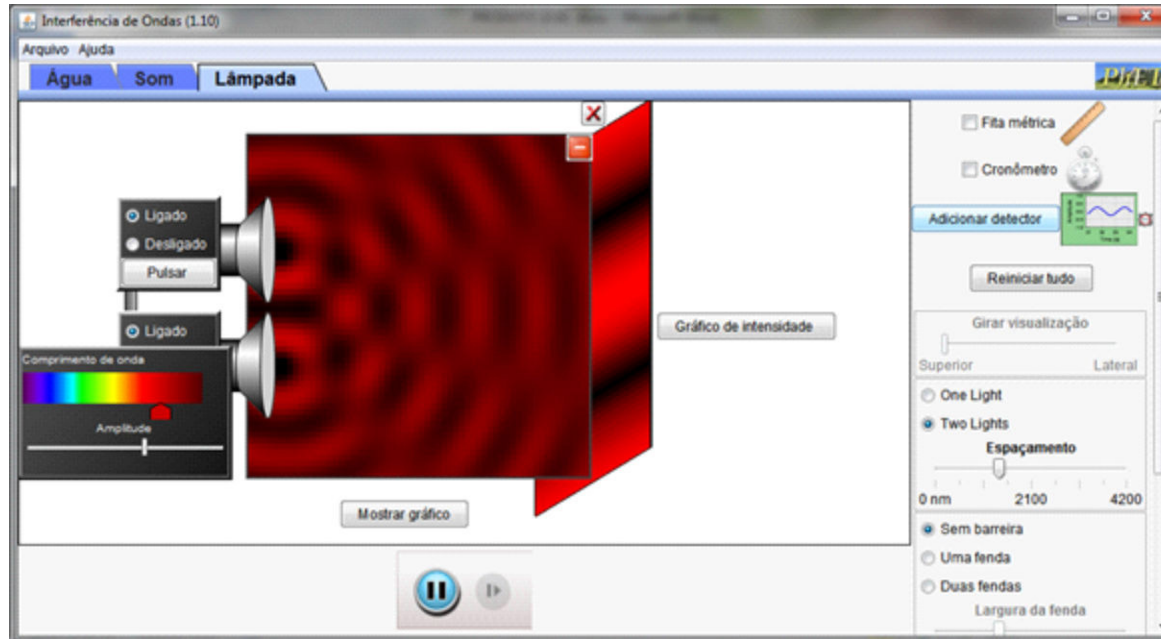


Figura 55 - Interferência entre duas fontes de luz vermelha.

O simulador usado até então também oferece opção de observar a interferência entre ondas sonoras, no entanto, acreditamos que a simulação Som, disponível em [http://phet.colorado.edu/pt\\_BR/simulation/sound](http://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/sound) seja mais esclarecedora para os estudantes uma vez que o alto-falante

pode ser movimentado para percepção do silêncio nas regiões de interferência destrutiva e do barulho quando a interferência é construtiva.

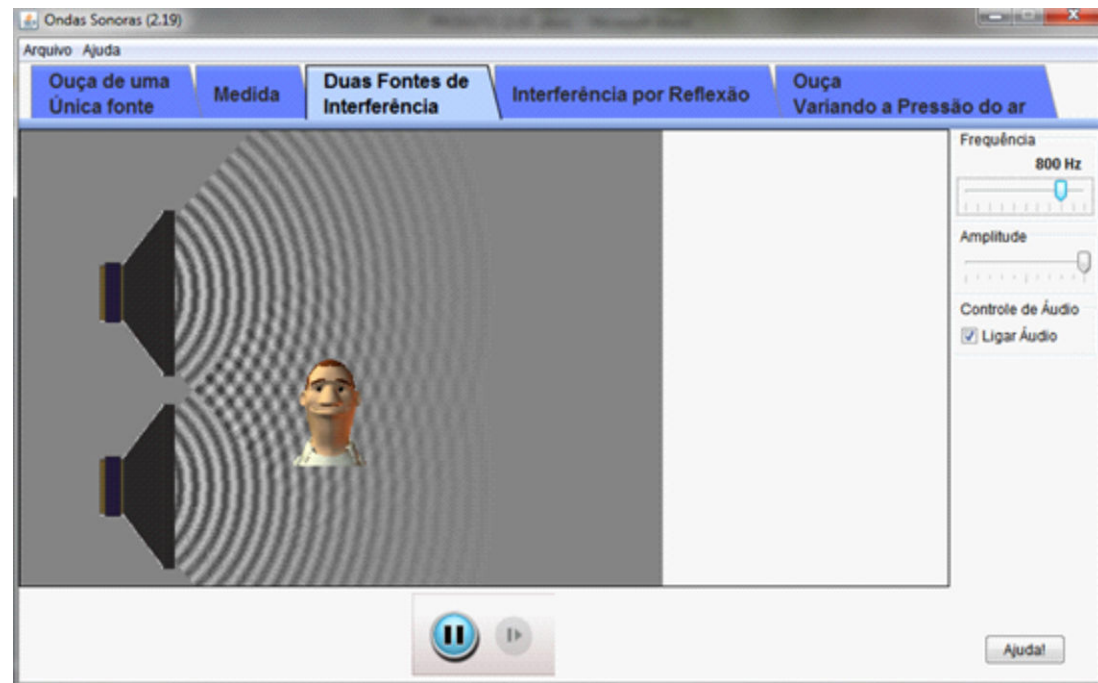
Figura 56 - Tela inicial da simulação som.

Quando iniciada, a simulação som se apresenta como na Figura 56. Note que é possível alterar a frequência e a amplitude da onda emitida, além de escolher ativar a opção ligar áudio. A Figura 57 mostra a aba

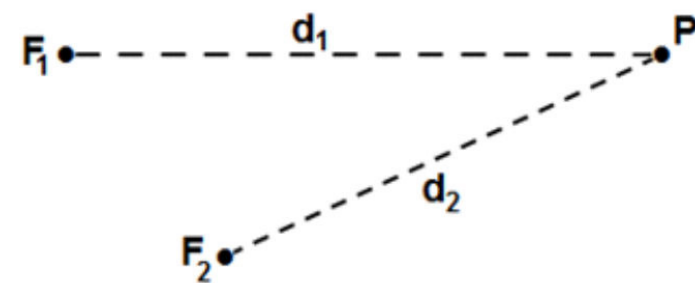


‘Duas fontes de Interferência’ do simulador som. Ao movimentar o ouvinte é possível perceber, com o áudio ligado, que nas regiões de interferência construtiva é emitido som enquanto nas regiões de interferência destrutiva se faz silêncio.

**Figura 57 - na interferência entre duas fontes o ouvinte pode ser movimentado para que se note a diferença entre as regiões de interferência construtiva e destrutiva.**



Para esclarecer aos alunos que a diferença de caminho percorrido pelas ondas até cada ponto é que determina se ocorrerá interferência construtiva ou destrutiva neste ponto, sugerimos que use a imagem da Figura 58. Você pode desenhar comprimentos de onda sobre a projeção ao longo dos dois caminhos indicados na figura, através da



representação de curvas senoides semelhantes, sobrepostas aos segmentos pontilhados. Considere que, no caso da luz, caberiam muitos comprimentos, uma vez que este valor é muito pequeno e proponha aos alunos que considerem que, após um dos caminhos estar completamente cheio, no outro ainda caberiam alguns comprimentos e que a quantidade de comprimentos naquela região determinaria o tipo de interferência.

**Figura 58 - Duas fontes de onda a distâncias distintas de um ponto P.**

Fonte: própria autora.

Peça aos alunos que determinem o tipo de interferência, caso naquela parte do caminho coubessem valores inteiros de comprimento de onda. Faça o mesmo, considerando que naquela diferença de caminho poderia caber quantidade fracionada de comprimentos de ondas. Se for preciso, utilize exemplos numéricos, para auxiliar no esclarecimento com os alunos.

Finalmente, apresente a expressão apresentada na Equação (9), na qual  $d$  é a diferença de caminho,  $\lambda$  é o comprimento de onda e  $n$  um número inteiro que, sendo par leva à interferência construtiva. Caso  $n$  seja ímpar, a interferência seria destrutiva.

Para melhor compreensão da interferência como soma das ondas em cada ponto, passaremos a execução de um roteiro sobre interferência de ondas eletromagnéticas por meio do software *Modellus* e, da mesma forma que anteriormente, recomendamos que você realize toda a atividade antes de apresentá-la aos seus alunos. O roteiro é apresentado na Figura 56 e solicita que os alunos retomem as observações feitas na atividade anterior, completando uma tabela indicando quais grandezas são representadas pelos parâmetros  $A$ ,  $\lambda$  e  $\phi$ . O roteiro pede ainda a descrição de como seriam percebidas modificações efetuadas em cada um deles, antes de usar o software para analisar a interferência entre as ondas.

É importante lembrar o que cada parâmetro na equação representa para a onda, pois, neste roteiro sugerimos que os valores sejam alterados diretamente na expressão.

<b>2ª Atividade com software MODELLUS</b> <b>Interferência de Ondas Eletromagnéticas</b>		Disciplina <b>FÍSICA</b>	Professora <b>ΣAMIA</b>	Série / Turma <b>2º</b>	Data <b>/ / 2015</b>												
Alunos (as) e números																	
<p><b>Comandos do software Modellus</b></p> <p>Para fazer uma multiplicação clique na barra de espaços.          Para inserir uma fração pressione simultaneamente as teclas <b>ALT GR</b> e <b>□</b>.</p> <p>A função cosseno é identificada automaticamente quando se digita <b>cos</b> seguido de parênteses.          A função seno é identificada automaticamente quando se digita <b>sin</b> seguido de parênteses.          Para incluir o <math>\pi</math> escreva <b>pi</b> ou clique no botão correspondente na aba 'modelo'.          Para números com casas decimais não utilize vírgula, mas sim ponto.          Não há opção de inserir letras gregas, por isso usaremos L para <math>\lambda</math>, e q para o <math>\phi</math>.</p> <p><b>1)</b> Utilizamos o software <i>Modellus</i> para criar gráficos para a equação</p> $E = A \cdot \cos\left(2\pi \cdot x - q\right)$ <p>do campo elétrico da onda eletromagnética se propagando no espaço em um instante de tempo fixo. Durante a atividade percebemos que os parâmetros A, L e q da equação correspondem a elementos da onda.</p> <p>Complete a tabela a seguir indicando qual é o elemento correspondente a cada parâmetro e como pode ser percebido no gráfico.</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 10px;"> <thead> <tr> <th style="width: 10%;"></th> <th style="width: 40%;">Grandeza</th> <th style="width: 50%;">Observação no gráfico</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;"><b>A</b></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"><b>L</b></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"><b>q</b></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p><b>2)</b> A interferência de ondas é a sua superposição no espaço e a onda resultante da interferência é dada pela soma das ondas originais.</p> <p>Considerando duas ondas distintas, com campos elétricos E1 e E2, a onda resultante terá campo elétrico E dado por <math>E = E1 + E2</math>.</p> <p>Para criar as ondas no software, insira as equações abaixo na janela 'Modelo matemático':</p> $E1 = 2 \cdot \cos\left(2\pi \cdot x - 0\right)$ $E2 = 2 \cdot \cos\left(2\pi \cdot x - 0\right)$ $E = E1 + E2$ <p>Na aba "variável independente" coloque x como variável indicada, coloque 3 para o valor máximo (max), deixe 0 no valor mínimo (min) e coloque 0.05 na opção "passo".</p> <p>Na aba "gráfico" já devem estar selecionadas <b>x</b> e <b>E1</b> nas duas primeiras colunas. Selecione <b>E2</b> e <b>E</b> nas colunas seguintes e ajuste cores distintas conforme sua preferência. Marque a opção "auto-escala". Clique em "interpretar" na aba modelo. Dê play (seta verde embaixo à esquerda) e observe os gráficos formados.</p> <p>a) Quantos gráficos podem ser vistos? _____          Quais?</p> <p>b) Se na aba 'gráfico' você definiu que seriam três, por que não vemos o terceiro?</p>				Grandeza	Observação no gráfico	<b>A</b>			<b>L</b>			<b>q</b>			<p>c) Apague o gráfico. Modifique o valor da amplitude de uma das ondas para 3 e dê play novamente. Quantos gráficos podem ser vistos agora? _____          Qual a amplitude da onda resultante? _____          Qual foi o tipo de interferência criada nesses casos?</p> <p><b>3)</b> Para que as ondas interfiram de forma a ter suas intensidades reduzidas é preciso que tenham _____ opostas e a interferência é do tipo _____.          Modifique, em uma das ondas, o parâmetro necessário para causar interferência destrutiva para <math>\pi</math>. Clique em "interpretar" e dê play.          Quais são as amplitudes de E1 e E2? _____          Qual é a amplitude da resultante E? _____          Para que a interferência seja totalmente destrutiva é necessário, além das condições acima, que _____.</p> <p>Ajuste o parâmetro necessário para a interferência totalmente destrutiva, clique em "interpretar" e dê play.          Quais são as amplitudes de E1 e E2? _____          Qual é a amplitude da resultante E? _____.</p> <p><b>4)</b> Sabemos que é possível a interferência entre ondas de comprimentos de ondas diferentes, no entanto a onda resultante terá um formato diferente das ondas iniciais. Para observar um exemplo, refaça os gráficos atribuindo 2 para a amplitude e 0 para a fase tanto de E1 quanto de E2. Coloque 1 para o comprimento de onda de uma delas 2 para o comprimento de onda da outra. Coloque o valor máximo da variável independente em 5. Dê play. Represente no espaço abaixo o formato da onda resultante.</p> <p><b>5)</b> O fenômeno batimento acontece quando as ondas que interferem tem mesma amplitude e frequências muito próximas. Se as frequências das ondas têm valores próximas o mesmo será verificado com os comprimentos de onda. Apague o gráfico e altere o valor máximo da variável independente para 30. Mantendo as amplitudes e fases do item anterior, gere novos gráficos com comprimentos 1 e 1.1 para observar o fenômeno citado. Faça uma representação do gráfico observado.</p> <p><b>6)</b> Espaço destinado à opinião do grupo sobre a atividade realizada nesta aula (se foi de fácil realização ou não, como contribuiu para a compreensão dos elementos da onda, etc).</p>		
	Grandeza	Observação no gráfico															
<b>A</b>																	
<b>L</b>																	
<b>q</b>																	

**Figura 59 - Roteiro de atividades sobre interferência para uso do software Modellus**

Como estamos tratando da superposição de duas ondas, usaremos E1 e E2 para indicar o campo elétrico de cada onda eletromagnética, e E para indicar a onda resultante da interferência de E1 e E2, de tal forma que E é dado pela soma de E1 e E2.

Para criar os gráficos, insira as equações na janela Modelo Matemático do software:

$$E1 = 2 \cos\left(2\pi x - 0\right)$$

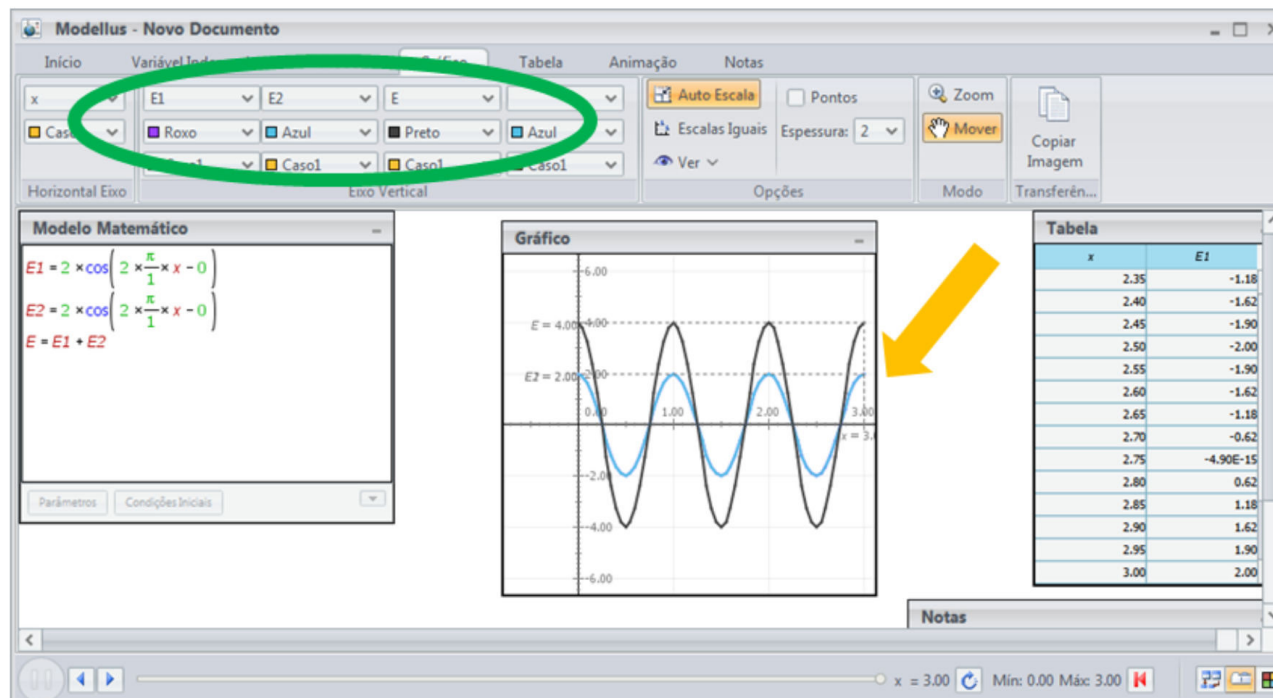
$$E2 = 2 \cos\left(2\pi x - 0\right)$$

$$E = E1 + E2$$

Lembre-se dos comandos para edição da janela modelo matemático disponíveis no Quadro 1. Tenha atenção especial com o sinal de multiplicação, que deve ser feito pressionando a barra de espaços. Para ajudar os estudantes a se recordarem destes comandos, o quadro com os mesmos foram colocados no início do roteiro.

Na aba “Variável Independente” coloque x como variável indicada, coloque 3 para o valor máximo (max), deixe 0 no valor mínimo (min) e coloque 0.05 na opção “passo”. Na aba “Gráfico” já devem estar selecionadas x e E1 nas duas primeiras colunas. Selecione E2 e E nas colunas seguintes e ajuste cores distintas, conforme sua preferência. Marque a opção “Auto-Escala” e, se desejar, altere a espessura da linha que desenhará o gráfico. Clique em “Interpretar” na aba Modelo. Dê *play* e observe os gráficos formados, como representados na Figura 60.

Note que, mesmo dando instruções para que sejam desenhados três gráficos, como destacado em verde na Figura 60, aparecem apenas dois gráficos. Isso acontece por que as equações dos gráficos E1 e E2 são idênticas, logo o software desenha um sobre o outro, de modo a só ser visualizado o segundo deles. O gráfico da onda resultante também é visualizado na Figura 60.



**Figura 60 - Gráficos formados quando são somadas duas ondas com equações idênticas.**

O item c da Atividade 2 do roteiro da Figura 56 pede que a amplitude de uma das ondas somadas seja modificada para o valor 3 e que sejam criados os gráficos novamente. Neste momento, é importante que a Atividade 1 te-

na ficado clara, pois o roteiro não fala qual dos valores deve ser modificado, cabendo ao estudante lembrar que a amplitude fica a cargo do coeficiente que multiplica a função trigonométrica. Os gráficos apresentam-se, então,

como na Figura 61, explicitando cada uma das ondas representadas.

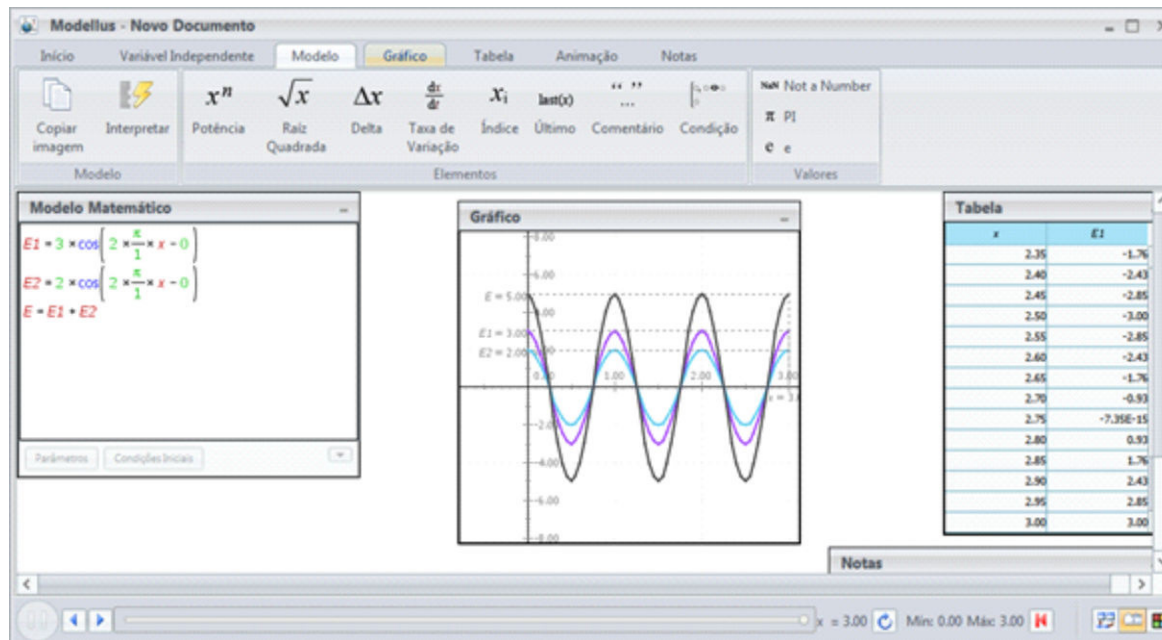
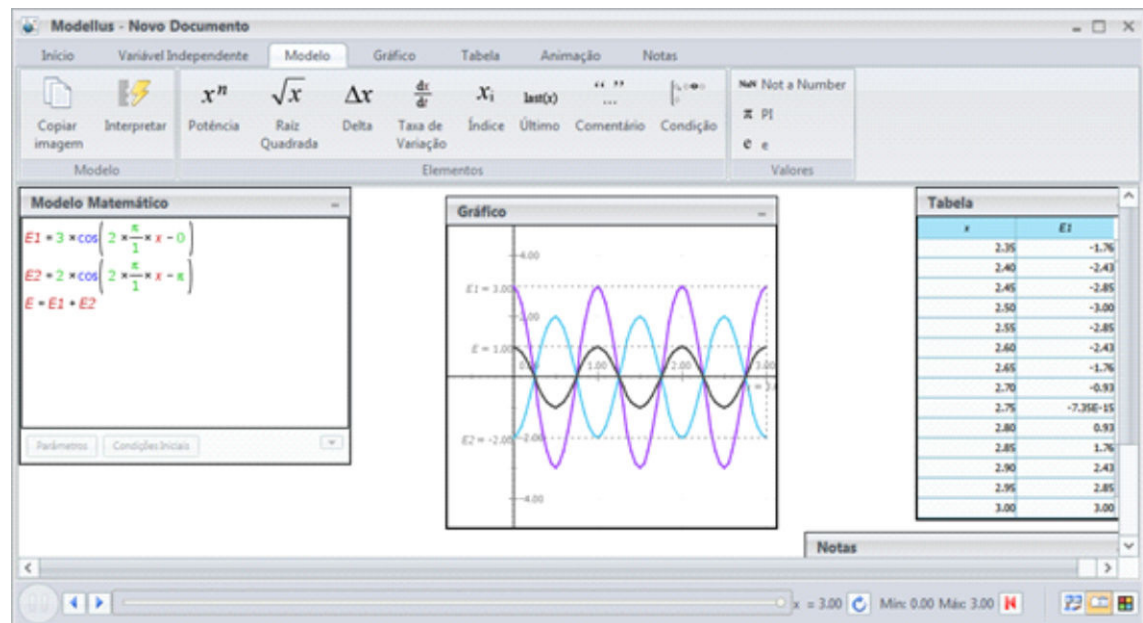


Figura 61 - Alterada a amplitude de uma das equações, visualiza-se os três gráficos.

O roteiro solicita citado o tipo de interferência observada nesse caso e, como E1 e E2 estão em concordância de fase, esta é construtiva. O roteiro segue tratando fases opostas, isto é, para que a intensidade de uma onda atue diminuindo a da outra. Alterando a fase de uma delas, os novos gráficos se apresentaram como na Figura 62.

Figura 62 - Onda resultante com amplitude menor, em virtude da interferência destrutiva.

A mesma atividade ainda aborda que, para que uma onda aniquilasse a outra completamente, ou seja, para que a interferência fosse totalmente destrutiva, seria necessário além das fases opostas que as amplitudes fossem iguais. Ajustando a amplitude de forma a se igualarem, obtemos aos gráficos da Figura 63.



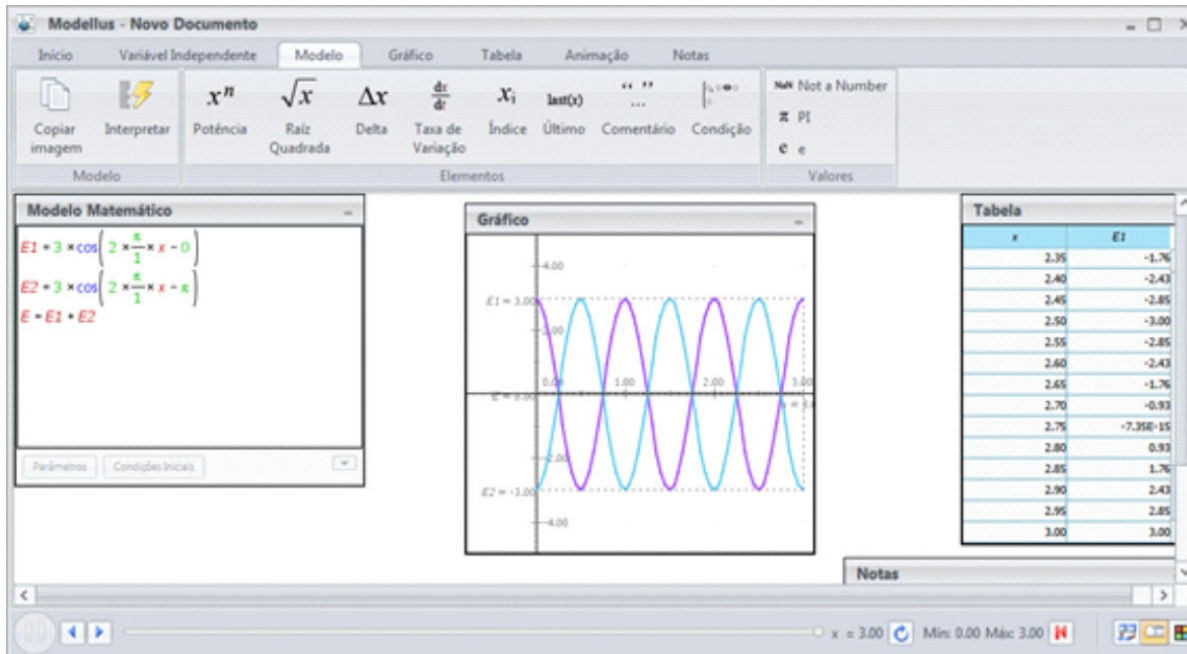


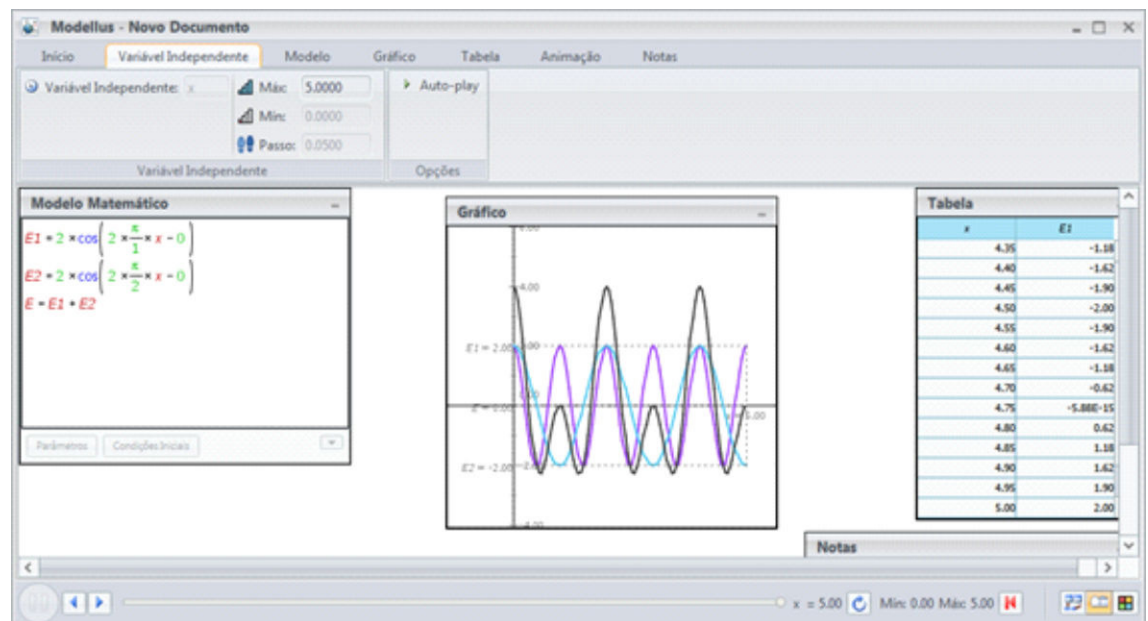
Figura 63 - Interferência totalmente destrutiva.

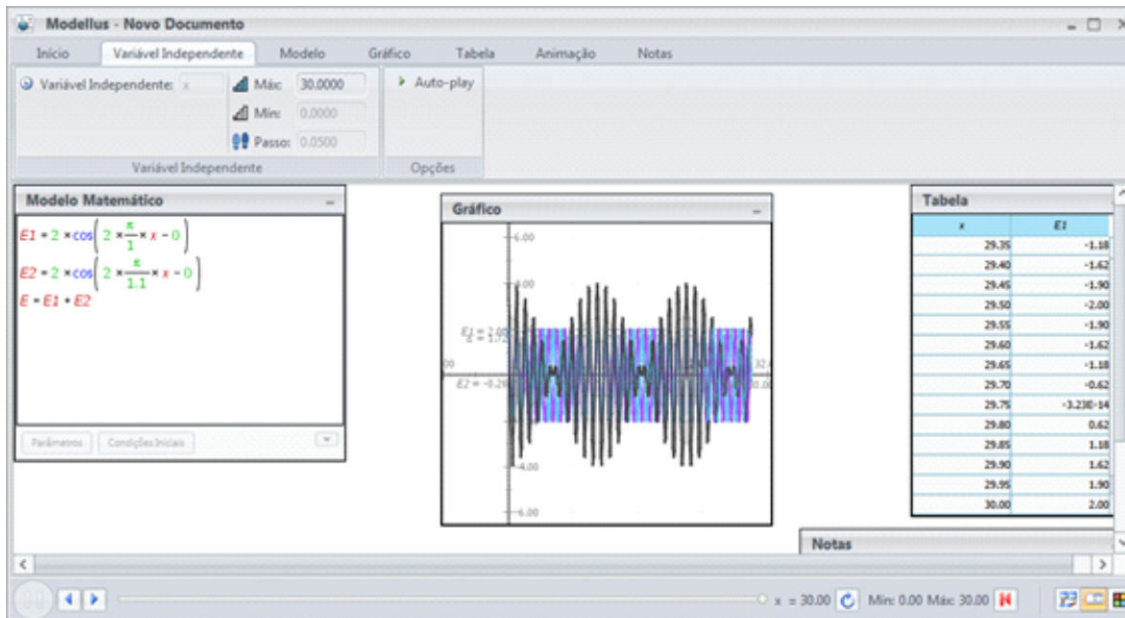
Para ilustrar que não são apenas ondas de mesmo comprimento e frequência que sofrem interferência, o roteiro sugere que os gráficos sejam refeitos, atribuindo-se o valor 2 para a amplitude e zero para a fase em ambas as equações, mas deixando-as com comprimentos de onda distintos, sendo 1 o valor de uma delas e 2 para a outra.

A fim de perceber que, apesar do formato diferenciado, a onda resultante ainda apresentará periodicidade, sugerimos aumentar o valor máximo para a variável independente para 5.

Figura 64 - Onda resultante da superposição de duas ondas com frequências diferentes.

Outro fenômeno que pode ser observado é o batimento, o qual acontece quando as ondas que interferem apresentam a mesma amplitude e frequências muito próximas. Se as frequências tem valores próximos, o mesmo será verificado com os comprimentos de onda. Para criar um gráfico





indicando o aspecto da onda resultante, nesse caso, apague o gráfico e modifique os comprimentos de onda para 1 e 1.1. A fim de visualizar melhor o resultado desta superposição, ajuste o valor máximo para a variável independente para 30. O gráfico formado se apresentará como na Figura 65.

**Figura 65 - Em preto, o gráfico do batimento: interferência entre ondas com frequências muito próximas.**

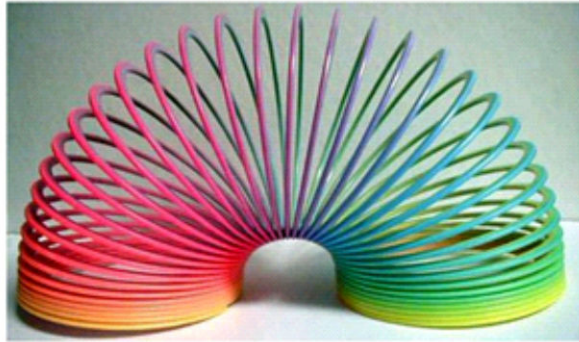
Os estudantes geralmente mostram um grande interesse e motivação pela realização de atividades experimentais, ainda que apenas com fins demonstrativos. A seguir, relacionamos duas atividades de fácil realização e feitas com materiais de baixo custo. Os materiais, dispostos no Quadro 2, podem ser providenciados por você para uso durante a aula. Outra possibilidade é que os alunos sejam orientados a providenciar os materiais em pequenos grupos.

**Quadro 2 - Materiais necessários às atividades experimentais.**

1 mola maluca  
 1 elástico com 3m de comprimento aproximadamente  
 Palitos de picolé ou recortes de papelão com o mesmo formato  
 Cola branca

Coloque a mola, como a apresentada na Figura 66, sobre a mesa, e peça a dois alunos que, segurando a mola pelas extremidades, gerem pulsos. É interessante solicitar aos alunos que classifiquem tais pulsos. Só podem

ser gerados na mola pulsos unidimensionais, no entanto, relativamente à direção de vibração, são possíveis pulsos transversais e longitudinais. Também, é possível mostrar com a mola maluca, a reflexão do pulso nas extremidades da mesma.



**Figura 66 - Brinquedo mola maluca.**

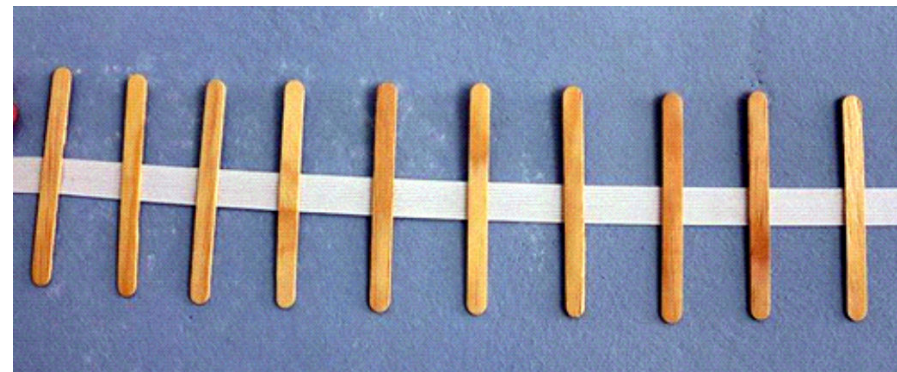
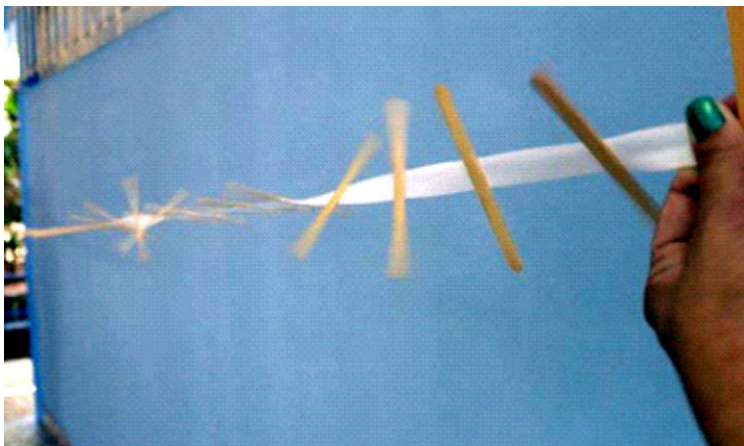
Fonte: <http://euseiquevocejateve-blog.tumblr.com/post/25116460973/eu-sei-que-voc%C3%AA-j%C3%A1-teve-mola-maluca>

A outra atividade é chamada de máquina de ondas e, para montá-la, coloque o elástico esticado sobre uma superfície lisa e cole os palitos de picolé perpendicularmente ao elástico, separados por cerca de 3 cm. É importante que os palitos fiquem bem alinhados no elástico e que a distância se mantenha constante. Depois que a cola secar, estará pronto para uso e ficará como na Figura 67.

**Figura 67 - Máquina de ondas criada com elástico e palitos de picolé.**

Foto: Ana Terra Castro.

Para realizar a atividade, é preciso que uma



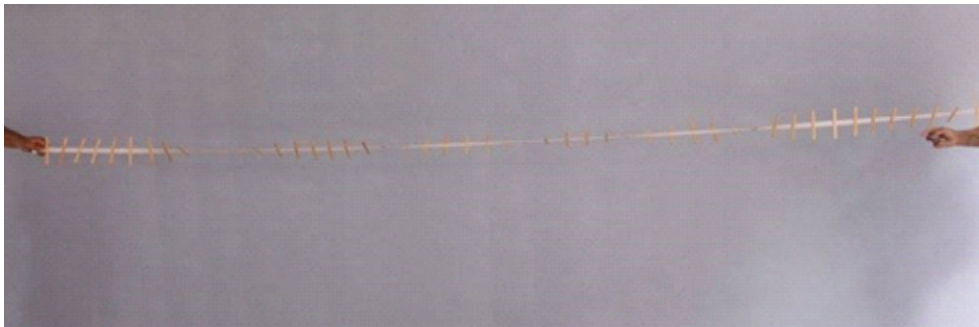
pessoa segure cada extremidade do elástico esticando-o levemente. Você pode provocar os pulsos batendo em um dos palitos ou segurando-o, torcendo e soltando. A oscilação percebida nos palitos é apresentada na Figura 68.

**Figura 68 - Dois pulsos sendo gerados na maquina de ondas.**

Foto: Ana Terra Castro.

Ao provocar um pulso, retome as classificações já realizadas com a mola maluca. Peça aos alunos que observem a reflexão desse pulso nas extremidades da mola. É possível mostrar, também, a refração da onda utilizando o experimento montado, basta colocar nas extremidades de uma parte dos palitos, balas de gelatina. Desta forma, a densidade dessa parte da máquina será alterada e ficará destacada a alteração da velocidade da onda ao mudar dos palitos sem as balas para os palitos com as balas ou vice-versa. Sugerimos também que sejam criados dois pulsos, um de cada lado do elástico para observar sua interferência.

Ao bater continuamente no mesmo palito, forma-se uma onda que será refletida sucessivamente nas extremidades e a interferência dessas ondas criará a onda estacionária. Nessa onda estacionária, mostrada na Figura 69, os pontos que não vibram, chamados nós, são resultado de interferência totalmente destrutiva e os pontos que possuem a amplitude máxima de oscilação sofrem interferência construtiva. As posições intermediárias entre essas máximas e mínimas seriam formadas pela superposição de ondas que estão fora de fase, mas que não estão exatamente em oposição de fase.



**Figura 69 - Onda estacionária na máquina de ondas.**

Foto: Ana Terra Castro.

Outro material que pode favorecer a visualização dos fenômenos é a mola helicoidal, mostrada na Figura 70, cujo comprimento varia de 2m a 14m, possui 1300 voltas e diâmetro de 25mm. Repita, com essa mola, os procedimentos realizados com a máquina de ondas.

**Figura 70 - Mola helicoidal longa.**

Fonte: [https://www.3bscientific.com.br/mola-helicoidal-snakey-u30034,p\\_834\\_16537.html](https://www.3bscientific.com.br/mola-helicoidal-snakey-u30034,p_834_16537.html)



## Difração

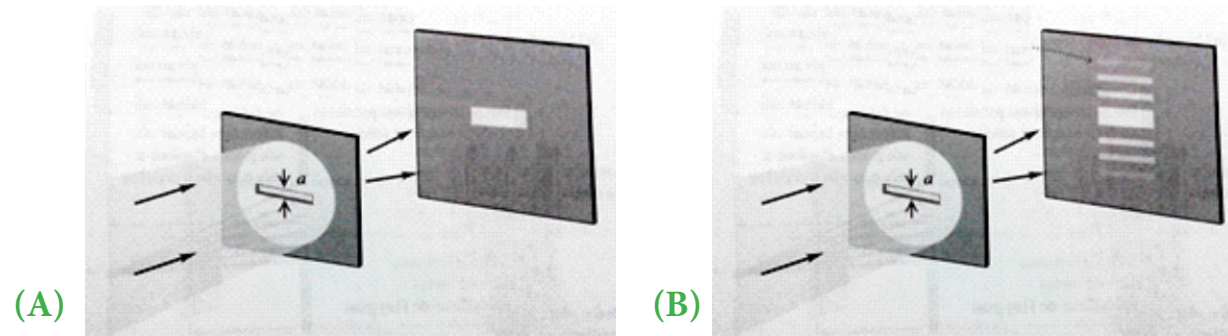
Para iniciar o conteúdo de difração, sugerimos uso de imagens, como nos slides mostrados na Figura 71.

**Figura 71 - Sugestão de imagens para iniciar o conteúdo de difração.**



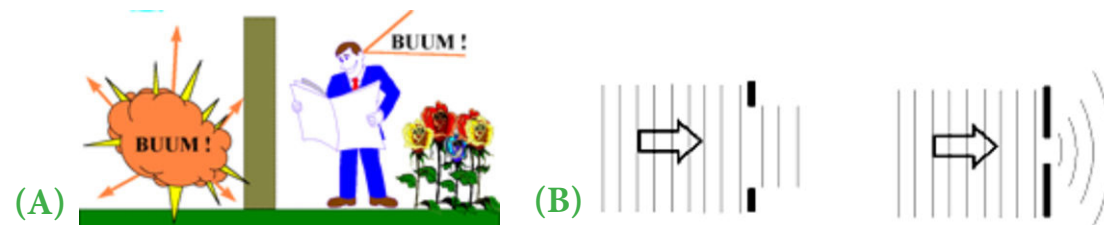
A imagem do primeiro slide, apresentadas na Figura 72 (A), pode ser utilizada para destacar a sombra geométrica esperada quando a luz incide no anteparo com a fenda. Antes de mostrar a imagem da Figura 72 (B), pergunte aos alunos o que aconteceria caso a espessura da fenda fosse reduzida. Não é muito provável que saibam a resposta, mas você pode instigá-los a pensar sobre isso. Apresente, então, a Figura 72 (B) esclarecendo que trata-se do fenômeno da difração, o qual é definido como o espalhamento da luz resultando no aparecimento de luz nas regiões onde se esperava apenas sombra geométrica.

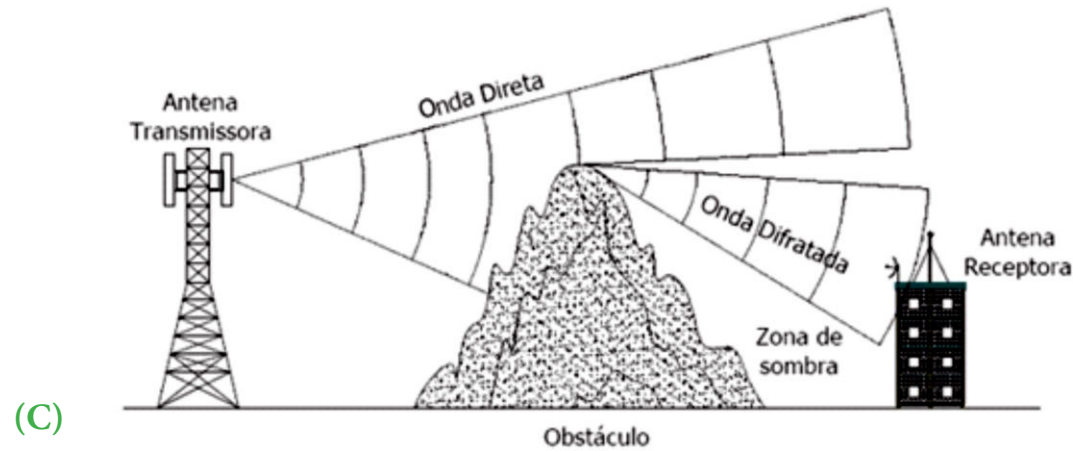
Figura 72 - (A) Sombra geométrica formada pelo anteparo com uma fenda e (B) franjas de difração quando a fenda apresenta espessura da ordem de grandeza do comprimento de onda da luz



Para ilustrar situações nas quais a difração é facilmente evidenciada, podem ser usadas as imagens apresentadas na Figura 73. A imagem (A) mostra a pessoa ouvindo o barulho da explosão que está do outro lado do muro, mesmo não conseguindo ver o que explodiu, tal imagem está disponível em <http://www.if.ufrj.br/~bertu/fis2/ondas2/ondas2.html>. (B) mostra uma representação de ondas em uma lâmina de água quando a fenda no anteparo é muito maior que o comprimento da onda e como seria a difração de tais ondas no caso da fenda ter tamanho comparável ao seu comprimento. Estas imagens estão disponíveis em <http://alunosonline.uol.com.br/fisica/difracao.html>. Já em (C) está representada a difração de ondas de rádio AM em um obstáculo e sendo recebida pela antena receptora localizada em um ponto da área destinada a zona de sombra. Este fenômeno não é bem observado em ondas de rádio FM uma vez que seu comprimento é muito menor do que o comprimento das primeiras.

Figura 73 - ilustrações de situações onde ocorre difração (A) o som ao incidir no muro, (B) ondas na superfície da água e (C) ondas de rádio AM chegando a uma antena receptora atrás de um obstáculo.





A Figura 74 mostra outros slides que podem ser utilizados a respeito da difração.

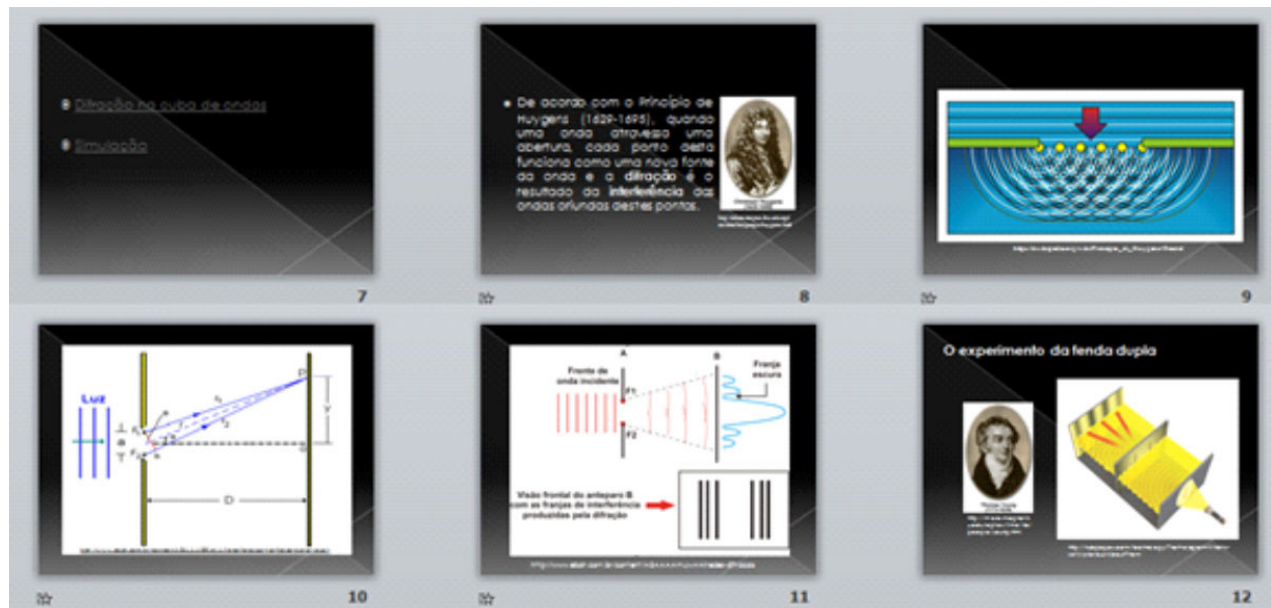


Figura 74 - Continuação dos slides para a aula de difração.

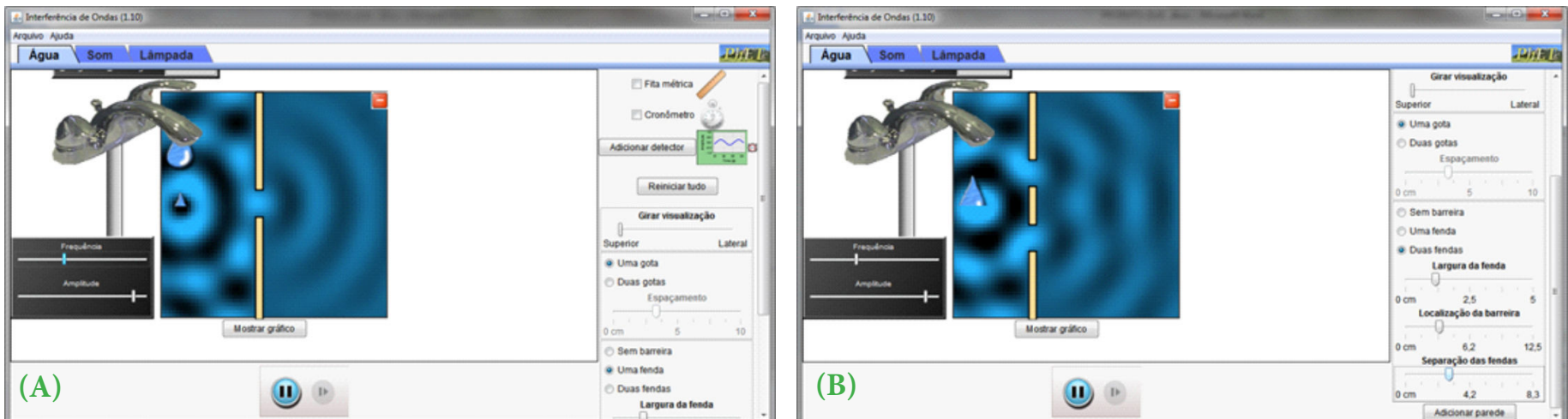
O primeiro link do slide de número 7, leva à exibição do vídeo Difração na cuba de ondas, disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=en-Q6EeP9frk> e representado pela Figura 75.



Figura 75 - Imagem extraída do vídeo  
Difração na cuba de ondas.

O segundo link leva à simulação interferência de ondas, já usada em dois momentos anteriormente. Desta vez, a simulação será utilizada para mostrar a difração em cada um dos casos. Na aba que representa a onda na água, selecione a opção uma fenda do lado direito da janela. Além dos ajustes na amplitude e na frequência que já foram considerados antes, aqui é possível ainda modificar a largura da fenda e a posição da barreira. O simulador permite ainda o uso de uma barreira com duas fendas e inclui neste caso a opção de modificar a separação entre as fendas. Exemplos de imagens da difração na água com (A) uma fenda e (B) duas fendas estão disponíveis na Figura 76.

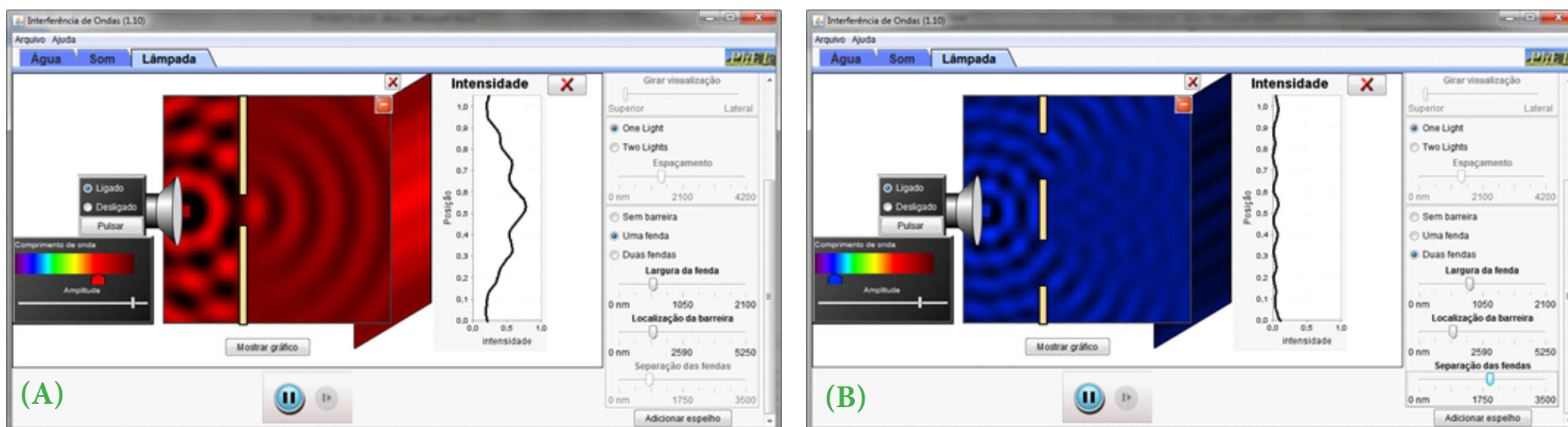
Figura 76 - Imagens da simulação de difração de ondas na água com (A) uma fenda e com (B) duas fendas.



De forma semelhante àquela feita com a água, a simulação também apresenta o caso do som e da luz. A

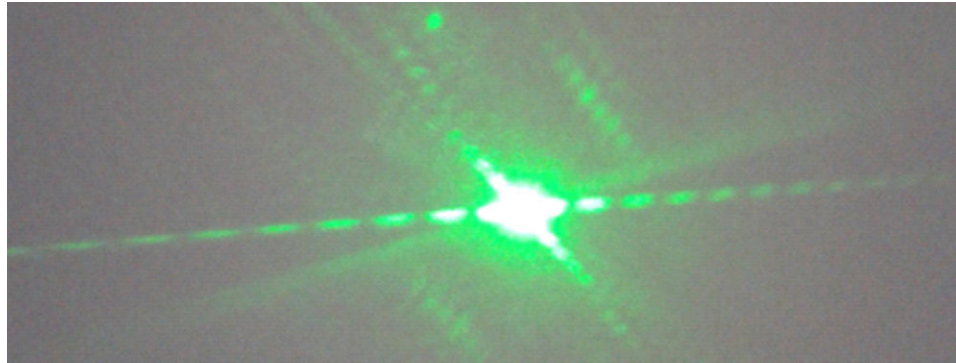
maior diferença no que se refere ao caso da luz é o fato de ser possível mostrar como ficaria a projeção da luz oriunda dos processos de difração e interferência num anteparo, como mostram as imagens disponíveis na Figura 77.

Figura 77 - (A) Difração da luz em uma fenda e (B) difração e interferência da luz em fenda dupla.



É importante discutir com os alunos que esta, como qualquer outra simulação, apresenta diferenças em relação a um experimento realizável ou aos fenômenos observados. Neste caso, fica explícito o erro na simulação quando se modifica, por exemplo, a cor da luz no botão comprimento de onda. Diante dessa alteração, a luz da nova cor escolhida demora a atingir o lado oposto da sala, dando a impressão de que a luz tem velocidade muito baixa e sabemos que seu valor é de aproximadamente  $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ .

A fim de mostrar de forma mais concreta aos alunos que o efeito de difração também acontece com a luz, você pode, usando um apontador laser, criar uma figura de difração, incidindo o feixe de laser sobre um fio de cabelo, como mostra a Figura 78. Ainda com o mesmo apontador, você pode usar outros recursos que tenha disponíveis para gerar novas figuras de difração, como um CD ou as ranhuras na película do telefone celular.

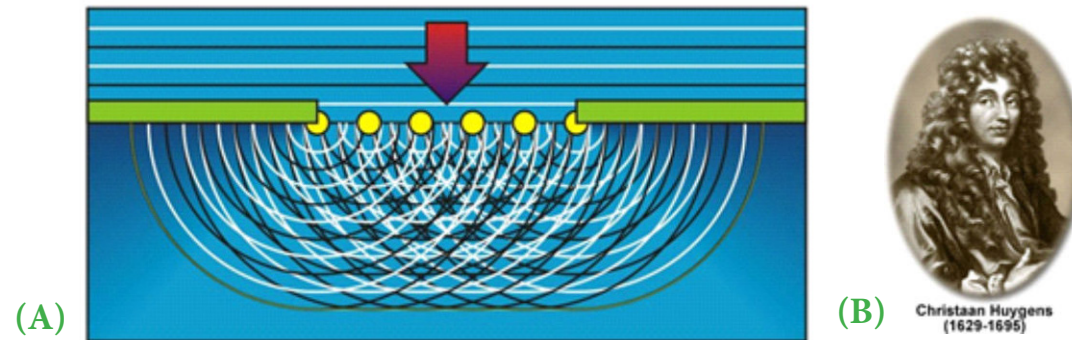


**Figura 78 - Figura de difração quando o laser é incidido em um fio de cabelo.**

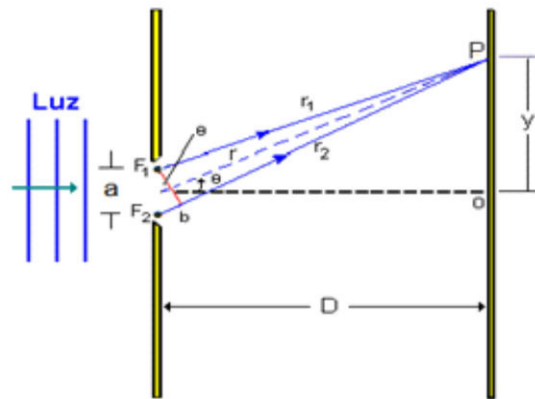
Imagem Própria da autora.

Para melhor elucidação do fenômeno, nos slides 8 e 9, sugerimos que seja apresentada difração de acordo com o princípio de Huygens, bem como a imagem do físico, mostradas na Figura 79 e disponíveis em [https://it.wikipedia.org/wiki/Principio\\_di\\_Huygens-Fresnel](https://it.wikipedia.org/wiki/Principio_di_Huygens-Fresnel) e <http://micro.magnet.fsu.edu/optics/timeline/people/huygens.html>, respectivamente.

**Figura 79 - (A) Representação da difração segundo o princípio de Huygens e (B) imagem do cientista.**



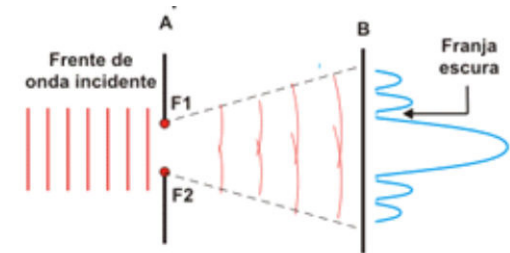
A imagem do slide 10, mostrada na Figura 80, e disponível em <http://www.ebah.com.br/content/ABAAABKz4AJ/interferencia-por-fenda-dupla-young> pode ser usada para dar ênfase na condição de, em cada ponto da projeção, haver uma linha clara ou escura, é que a interferência entre as ondas oriundas dos vários pontos da fenda seja construtiva ou destrutiva, respectivamente. Nesse momento, você deve retomar a análise da quantidade de comprimentos de onda a ocupar a diferença de caminho feita na atividade sobre interferência.



**Figura 80 - Análise da condição para que no ponto P haja uma franja clara ou escura.**

A imagem da Figura 81, disponível em <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAmuWAH/redes-difracao>, pode ser apresentada para que os estudantes tenham, desde já, uma ideia de que a incidência da luz no anteparo após a difração varia conforme a posição, mas é simétrica em relação ao centro da fenda. Você pode, se quiser, esclarecer aos alunos que posteriormente farão uma análise matemática da curva de intensidade da luz projetada no anteparo B desta figura.

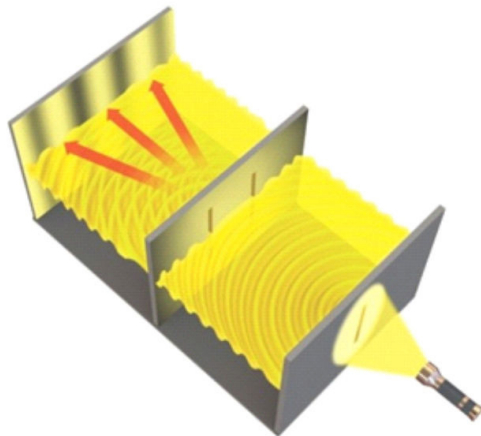
**Figura 81 - Representação gráfica da intensidade da luz incidente no anteparo após a difração e uma visão frontal do efeito produzido.**



Visão frontal do anteparo B com as franjas de interferência produzidas pela difração



Para fechar a apresentação de slides, sugerimos uma representação do experimento de Young, como aquela mostrada na Figura 82, e disponível em <http://hubpages.com/technology/The-Hologram-What-is-so-Mysterious-About-Them>. Tal imagem podem esclarecer aos alunos as dificuldades que Thomas Young precisou vencer para conseguir verificar que a difração também ocorre para a luz, uma vez que na época ainda não havia sido inventado o laser.



**Figura 82 - Representação do experimento de Young.**

Para análise gráfica da intensidade da luz que incide no anteparo após difração em uma fenda simples, sugerimos o roteiro apresentado na Figura 80. Para execução do roteiro os alunos deverão ser reunidos nova-

mente em pequenos grupos com acesso a um computador em que esteja instalado o software *Modellus*.

A primeira atividade proposta no roteiro solicita que os alunos expliquem o fenômeno de difração e é importante para que retomem todas as discussões feitas anteriormente. A segunda atividade apresenta a Equação (10), que relaciona a intensidade luminosa  $I$  que atinge o anteparo em função da posição  $x$  neste anteparo.

$$I = I_m \cdot \left( \frac{\sin\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right)}{x} \right)^2$$

Nessa equação,  $I_m$  representa a intensidade luminosa máxima projetada no anteparo e  $\lambda$  indica o comprimento da onda. O roteiro pede que os alunos substituam valores determinados para a intensidade máxima e o comprimento de onda, a fim de encontrar a expressão a ser utilizada no modelo matemático do software. Ao substituir os valores fornecidos, a equação a ser inserida no software ficará como mostra a Equação (11).

$$I = 2 \cdot 10^2 \cdot \left( \frac{\sin(x)}{x} \right)^2$$

<b>3ª Atividade com software MODELLUS</b> <b>Difração de Ondas Eletromagnéticas</b>	Disciplina <b>FÍSICA</b>	Professora <b>SAMIA</b>	Série/Turma <b>2º</b>	Data / / 2015
--	-----------------------------	----------------------------	--------------------------	------------------

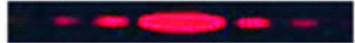
Alunos (as) e números

**Comandos do software Modellus**

Para fazer uma multiplicação clique na barra de espaços.  
 Para inserir uma fração pressione simultaneamente as teclas **ALT GR** e  $\frac{\square}{\square}$ .

A função cosseno é identificada automaticamente quando se digita **cos** seguido de parênteses.  
 A função seno é identificada automaticamente quando se digita **sin** seguido de parênteses.  
 Para incluir o  $\pi$  escreva **pi** ou clique no botão correspondente na aba 'modelo'.  
 Para números com casas decimais não utilize vírgula, mas sim ponto.  
 Não há opção de inserir letras gregas, por isso usaremos L para  $\lambda$  e q para  $\phi$ .

**1)** A figura a seguir mostra uma fotografia do fenômeno da difração obtido incidindo um feixe de laser em um obstáculo.



Como pode ser explicado este fenômeno?

**2)** A amplitude da onda resultante tem intensidade dada pela expressão

$$I = I_m \cdot \left( \frac{\sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x\right)}{x} \right)^2$$

Considerando a intensidade máxima da amplitude ( $I_m$ ) como  $2 \cdot 10^2$  e o comprimento de onda no valor de  $2\pi$ , reescreva a equação substituindo os valores fornecidos.

**3)** Para criar o gráfico da amplitude da onda resultante no software *Modellus*, insira a equação determinada no item 2 na janela 'Modelo matemático'.  
 Clique em 'interpretar'.  
 Na aba 'Variável independente' determine a variável x e coloque  
 valor máximo = 20  
 valor mínimo = -20  
 passo = 0.1

Na aba 'gráfico' clique em 'auto\_escala' e verifique se a variável independente x está selecionada para o eixo horizontal e I para o eixo vertical.  
 Clique em play e observe o gráfico.  
 a) Faça uma representação do gráfico obtido.

b) O gráfico indica que o efeito de difração pode ser percebido claramente em algumas regiões e é insignificante em outras. Indique a região (intervalo de x) para cada caso.

**Dica:** Se for necessário ajustar a escala para melhor visualização dos valores no gráfico, posicione o cursor sobre o ponto do gráfico de forma que apareça uma seta dupla, clique e arraste. Com o cursor em forma de mão é possível arrastar o gráfico pela janela sem alterar a escala.

**4)** a) Qual a intensidade do máximo central (pico no centro do gráfico)? \_\_\_\_\_  
 b) Qual a intensidade do segundo máximo? \_\_\_\_\_  
 c) Qual a intensidade do terceiro máximo? \_\_\_\_\_  
 d) Qual a razão entre a intensidade do máximo central e do segundo máximo?

e) Diante dos resultados dos itens anteriores é possível determinar a posição que concentra a maior parte da luz incidente no anteparo. Qual é essa posição?

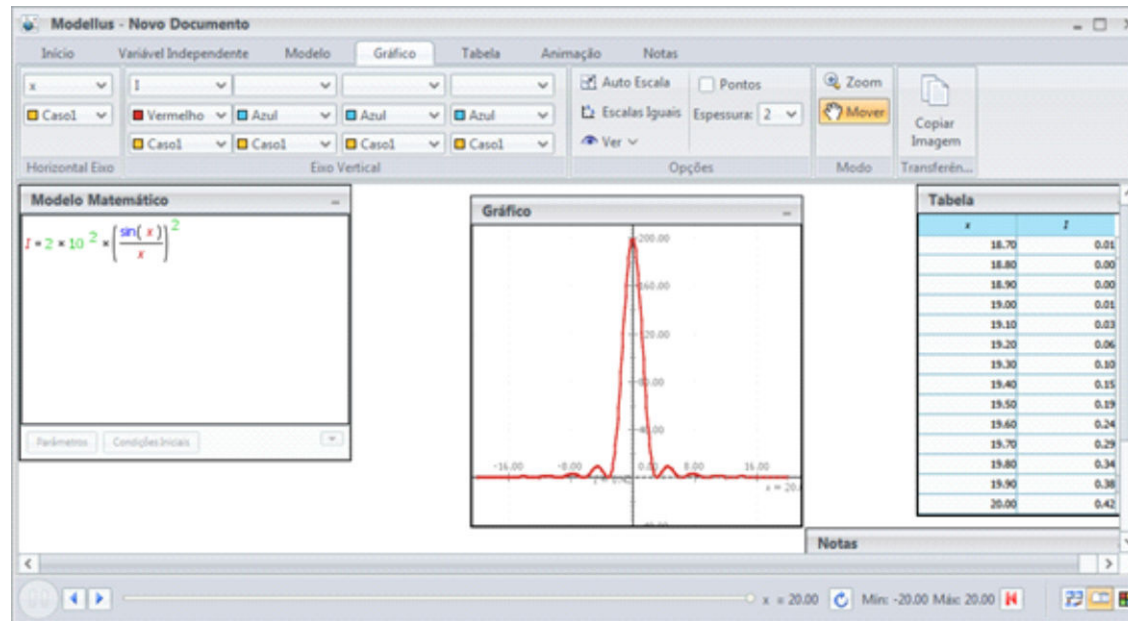
f) Entre as regiões de máximo (picos) existem pontos de intensidade zero. Indique alguns dos zeros do gráfico. Como podemos explicar o fato de que não existe luz nesses pontos?

**5)** Espaço destinado à opinião do grupo sobre a atividade realizada nesta aula (se foi de fácil realização ou não, como contribuiu para a compreensão do conteúdo, etc).

**Figura 83 - Roteiro para análise gráfica da curva de intensidade da luz incidente após a difração.**

Ao inserir a Equação (11) na janela modelo matemático, é importante ter em mente os comandos do software apresentados no Quadro 1. Para incluir expoentes no modelo, há um botão específico na aba Modelo. Clique em Interpretar. Na aba Variável Independente, determine a variável x e coloque 20 para o valor máximo, - 20 para o valor mínimo e deixe o passo com o valor 0.1. Na aba 'Gráfico' clique em 'Auto Escala' e verifique se a variável independente x está selecionada para o eixo horizontal e I para o eixo vertical. Ajuste a cor e a espessura conforme sua preferência. Clique *play* e observe o gráfico formado, como aquele apresentado na Figura 84.

Figura 84 - Gráfico para intensidade luminosa gerado pelo software Modellus.



O roteiro apresenta questões para explorar o gráfico gerado. Entre as questões, estão identificar as intensidades do máximo central e dos máximos secundários, localizar pontos de mínimo além de elencar a região onde o efeito é perceptível, que parece ficar entre as posições  $-16$  e  $+16$ . O roteiro também pergunta o que leva à formação de pontos sem luminosidade entre os máximos.

Apesar de parecer mais simples que as demais atividades usando o software, os alunos podem demorar mais de uma aula para sua execução, uma vez que geralmente apresentam dificuldades na leitura de gráficos com formato diferente do habitual e também na identificação das grandezas pedidas nestas leituras, por vezes confundindo a leitura da intensidade (eixo vertical) com a da posição (eixo horizontal).

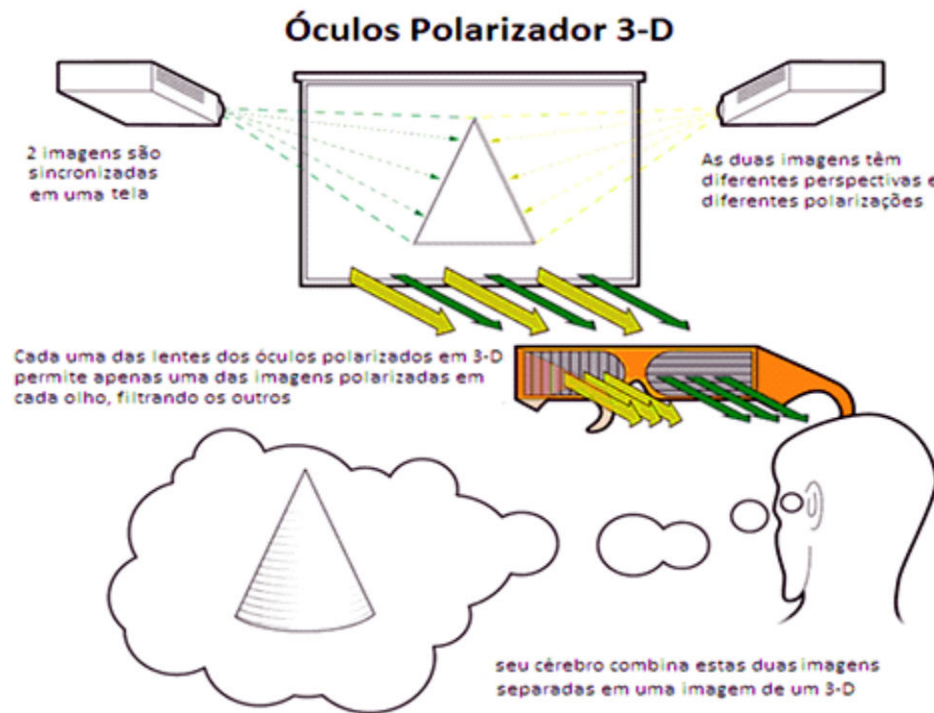
## Polarização

Para iniciar o assunto de polarização sugerimos apresentação como a apresentada na Figura 85.

Figura 85 - Slides para apresentação do conteúdo de polarização.



Retomando o questionário preliminar que, na quarta questão, tratava da projeção 3D utilizada no cinema e em alguns aparelhos de uso residencial, iniciamos a aula com a leitura ‘ponto a ponto’ de um texto elaborado a partir dos textos disponíveis em <http://mundoestranho.abril> e <http://www.vocesabia.net/> a respeito do funcionamento dos óculos usados nos cinemas. Esse último esclarecia que existe mais de uma possibilidade tecnológica para criação da imagem tridimensional. Nosso recorte dava destaque à tecnologia mais comum nos cinemas hoje em dia, que utiliza a polarização por meio dos óculos e, ainda, dispunha de uma Figura explicativa bastante simples e didática, mostrada na Figura 86.



**Figura 86 - Representação do funcionamento dos óculos polarizadores utilizados no cinema 3D.**

A metodologia de leitura referida consiste em cada aluno ler em voz alta uma oração do texto, parando no ponto seguinte para que o próximo aluno siga com a leitura. Acreditamos que a leitura é mais bem realizada quando os alunos não são obrigados a ler, mas o fazem de forma voluntária. Caso os alunos dispostos a ler para a turma não sejam muitos é possível adaptar a metodologia de leitura para ‘parágrafo a parágrafo’, em que cada aluno leria um parágrafo do texto deixando o próximo para que o aluno seguinte leia.

No slide seguinte apresentamos, juntamente com um conceito da polarização e a condição para que aconteça, um *link* para uma animação sobre o fenômeno. A animação apresentada na Figura 87, pode ser encontrada em <https://drive.google.com/file/d/0B-KWZ4pgvMISVHFZZ1VzaXExQVvk/view?usp=sharing>. Para executar a animação é necessário que esteja instalado na máquina algum software adequado ao tipo de arquivo. Uma sugestão é o software

gratuito disponível em <http://swf-player.softonic.com.br/download>.

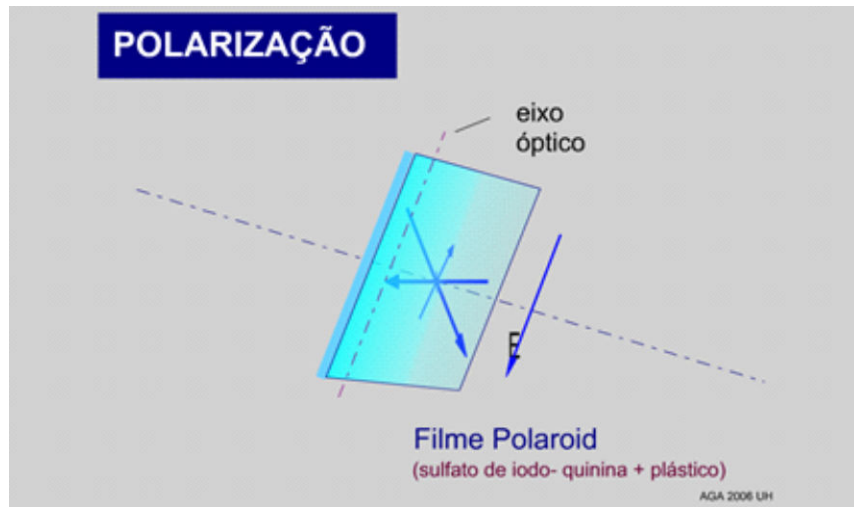
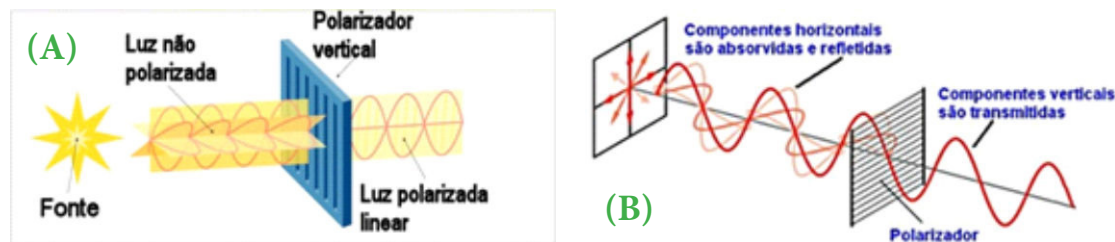


Figura 87 - animação sobre polarização.

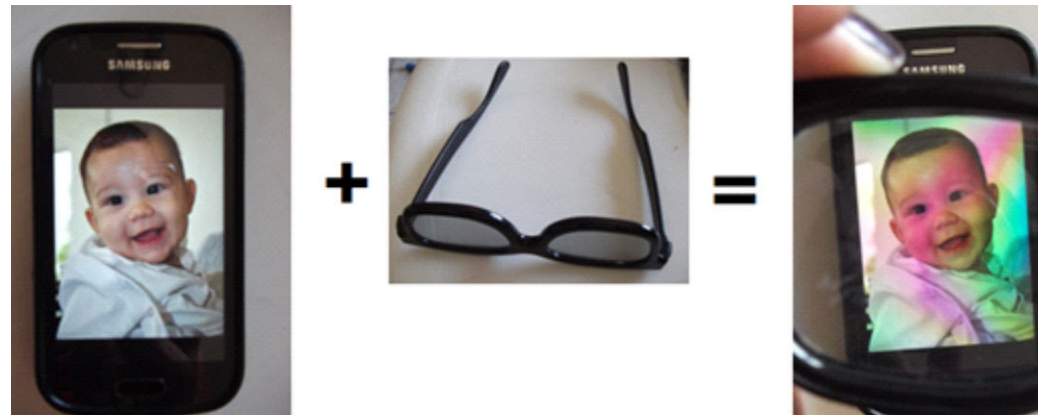
Nos slides 6 e 7 sugerimos imagens sobre o fenômeno para auxiliar na elucidação dos alunos. As imagens são mostradas na Figura 88 e estão disponíveis em (A) <http://astro.if.ufrgs.br/telesc/node7.htm> e (B) <http://educacao.globo.com/fisica/assunto/ondas-e-luz/fenomenos-ondulatorios.html>.

Figura 88 - Imagens representativas da polarização.



Um par de óculos polarizador usado em cinema 3D pode ser mostrado aos alunos, os quais devem ser orientados a observar a luz emitida pela tela dos seus celulares através das lentes dos óculos e girar a lente durante a observação. A percepção de que as cores da luz emitida pela tela do celular sofrem modificações enquanto a lente é girada na sua frente, como mostra a Figura 89, possibilita a discussão sobre o fato de cada lente ter uma polarização diferente e que é a combinação das imagens obtidas com as duas que criam o efeito de imagem tridimensional percebido no cinema.

Figura 89 - Alteração na cor da luz emitida pela tela do celular quando os óculos polarizadores são girados na sua frente.



Fonte: Própria da autora.



Considerando as polarizações distintas nas lentes dos óculos é possível discutir também que, com duas lentes de polarização contrárias seria possível anular a luz emitida por alguma fonte, como mostra a Figura 90.

Figura 90 - e as lentes forem combinadas de forma que fiquem com polarizações opostas a luz pode ser impedida de passar.

Fonte: <http://www.infoescola.com/fisica/polarizacao-da-luz/>

Essa neutralização da luz pode ser representada através da animação disponível em [http://www.1papacaio.com.br/modules.php?op=modload&name=Sala\\_aula&file=index&do=showpic&pid=2303&orderby=titleA](http://www.1papacaio.com.br/modules.php?op=modload&name=Sala_aula&file=index&do=showpic&pid=2303&orderby=titleA) e representada na Figura 91.

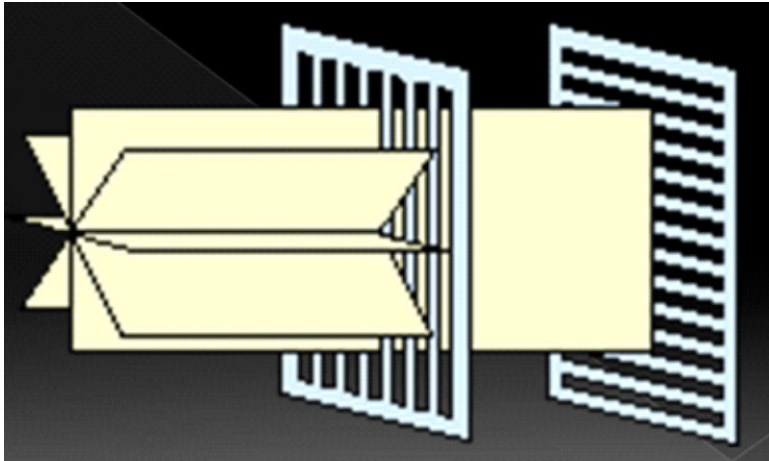
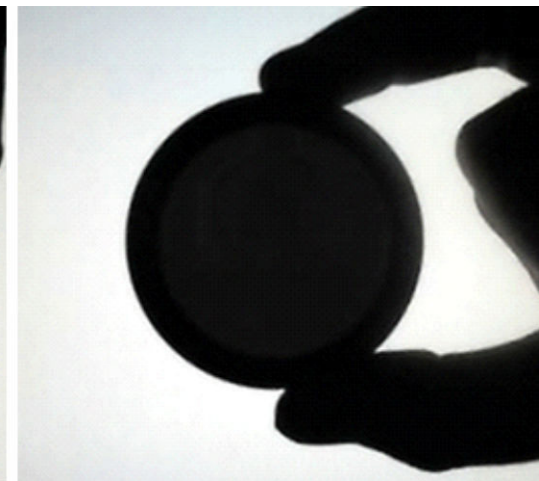
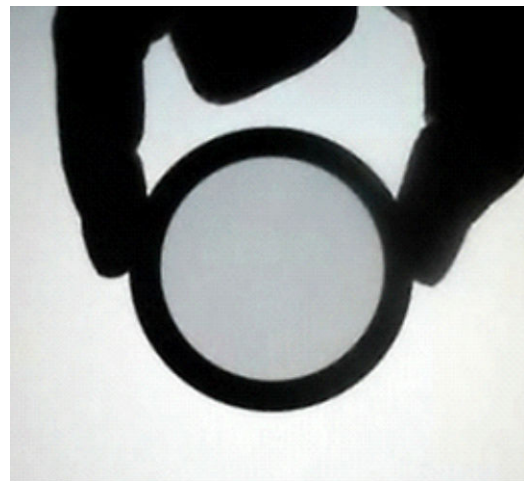


Figura 91 - Animação mostrando dois polarizadores opostos anulando um feixe de luz.

Para mostrar a anulação da luz usando apenas um polarizador sugerimos a animação disponível em [http://www.dicionario.pro.br/index.php/Luz\\_polarizada](http://www.dicionario.pro.br/index.php/Luz_polarizada) e representada na Figura 92.

Figura 92 - Imagens da animação em que um polarizador é girado sobre uma fonte de luz polarizada, permitindo ou não a passagem de luz dependendo da orientação de sua polarização.

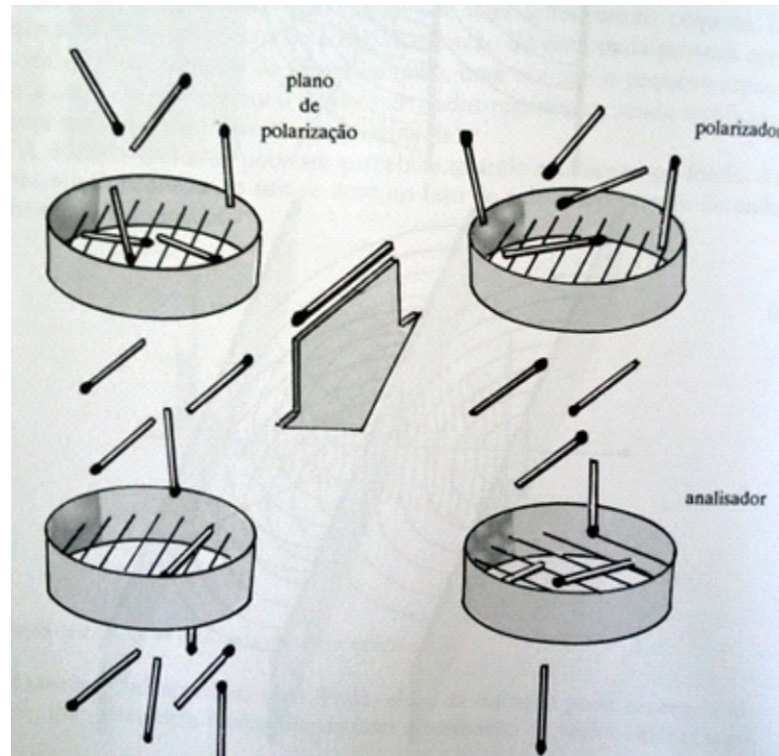


Outra forma de mostrar aos alunos essa possibilidade é posicionar e girar os óculos de cinema diante da lente do projetor multimídia. Com o computador ligado, ocorrerá efeito semelhante ao da Figura 89 e, caso não esteja sendo projetada nenhuma imagem, pode acontecer como na Figura 92.

Para encerrar a atividade sugerimos a representação do polarizador através de uma peneira de barbante. Para formar a peneira, utilize um suporte circular ou retangular, metálico ou de madeira, como por exemplo, um suporte de bordado ou a armação de um porta-retratos comum. Prenda com fita adesiva pedaços de barbante no suporte de forma que fiquem paralelos uns aos outros. Solte palitos de fósforo sobre a peneira para que os alunos

percebam que só a atravessam aqueles palitos que estiverem alinhados com a malha da peneira, como na Figura 93.

Figura 93 - Representação da peneira de barbantes.

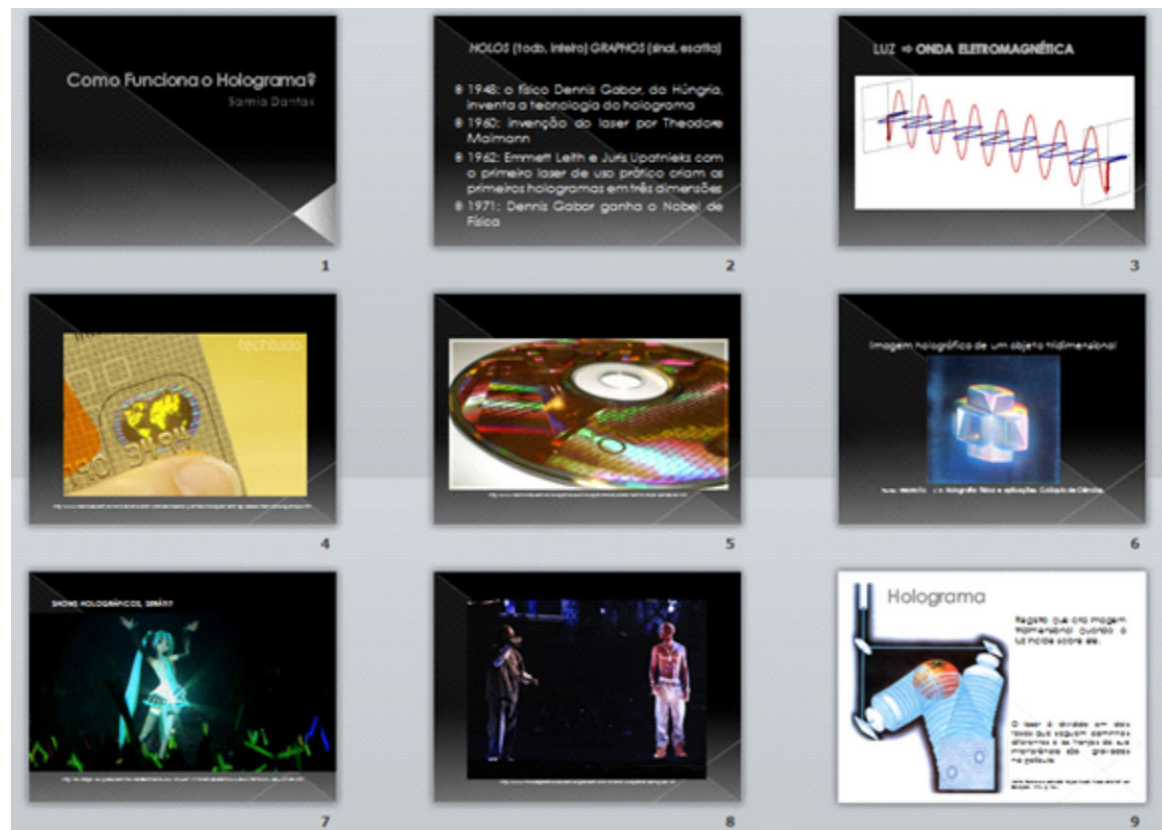


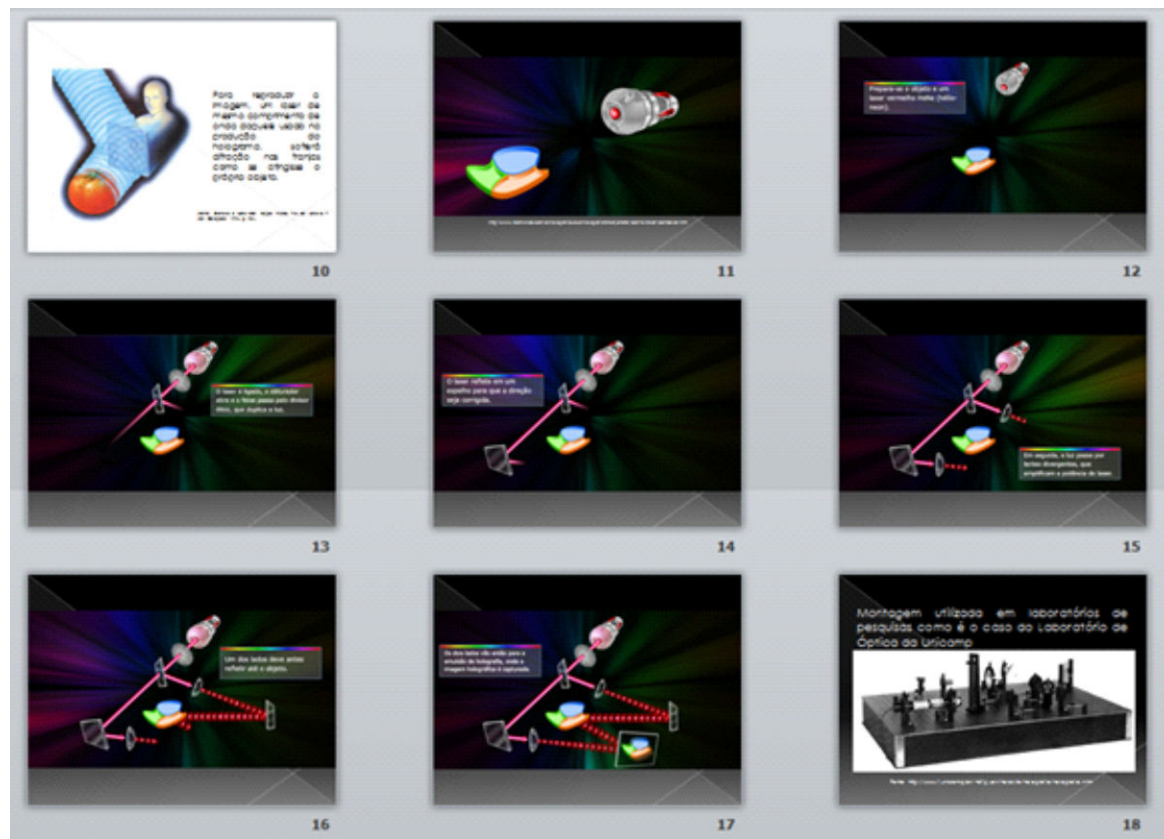
Fonte: GREF, 2002, p. 220.

## Enfim, o holograma

Para encerrar a sequência sugerimos a retomada da última pergunta do questionário preliminar, que faz menção ao holograma e é fundamental para a coerência interna da proposta. Sugerimos o uso, mais uma vez, da projeção em multimídia para aproveitamento de recursos como imagens e animações. Uma opção de apresentação pode ser encontrada na Figura 94.

Figura 94 - Slides sugeridos para a apresentação sobre o holograma.





Consideramos importante que seja realizada uma contextualização histórica acerca do tema, como foi feita para a natureza da luz. Por isso o slide de número 2, traz algumas informações como a invenção da técnica do holograma em 1948 por Denis Gabor, na Hungria. No entanto, a invenção do laser só aconteceu em 1960, por Theodore Maimann, o que possibilitou que Emmett Leith e Juris Upatnieks produzissem o primeiro laser de uso prático e criassem os primeiros hologramas em três dimensões. A tecnologia do holograma deu a Gabor o Nobel de Física em 1971.

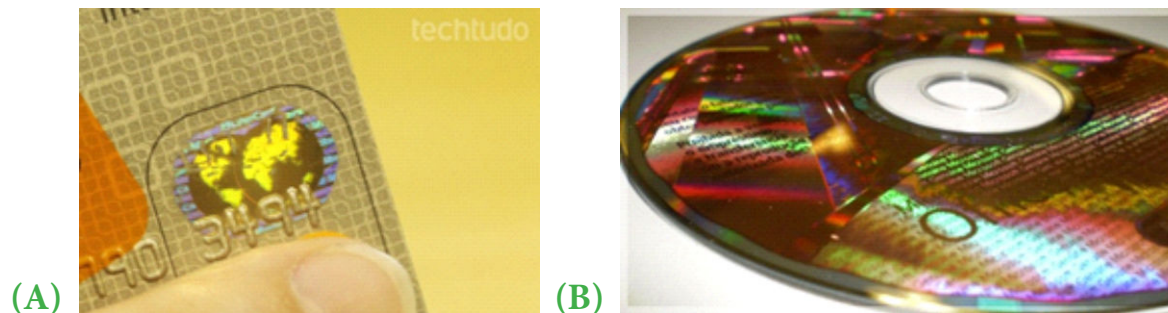
É comum que diante de tais fatos históricos alguns estudantes pensem que o cientista, no caso Gabor, tenha sido um grande gênio e que, como num passe de mágica, tivesse elaborado a teoria para a construção do

holograma, mesmo sem dispor de recursos. Acreditamos que é necessário enfatizar com os alunos que o desenvolvimento da ciência não acontece por magia e que requer muito trabalho. Caso eles estejam dispostos a se dedicar ao trabalho científico poderão também se tornar cientistas.

Para recordar que a luz é uma onda eletromagnética e suas classificações, mostramos novamente, no terceiro slide, a animação disponível em <https://bioressonancia.wordpress.com/sobre-a-biorressonancia/>.

Nos slides de números 4 e 5, mostramos imagens em que os hologramas são considerados garantia de autenticidade de produtos. Como no caso dos cartões de crédito e conteúdos multimídia, apresentados na Figura 95 e disponíveis em <http://www.techtudo.com.br/noticias/noticia/2015/02/conheca-origem-dos-hologramas-e-aplicacoes-da-tecnologia-hoje.html> e <http://www.tecmundo.com.br/holografia/4343-holografia-o-3d-ja-esta-com-os-dias-contados-.htm>.

**Figura 95 - Uso de hologramas comprovam autenticidade de (A) cartões de crédito e (B) discos multimídia.**



A imagem da Figura 96 mostra o holograma de um objeto tridimensional e foi extraída do trabalho de José Manuel Rebordão, pesquisador do Laboratório Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial (LNETI) de Portugal, acessível em [https://www.fc.ul.pt/sites/default/files/fcul/sociedade/Holografia%20-%20F%C3%ADsica%20e%20aplica%C3%A7%C3%B5es%20\(Gulbenkian,%20Col%C3%B3quio%20Ci%C3%A2ncias\).pdf](https://www.fc.ul.pt/sites/default/files/fcul/sociedade/Holografia%20-%20F%C3%ADsica%20e%20aplica%C3%A7%C3%B5es%20(Gulbenkian,%20Col%C3%B3quio%20Ci%C3%A2ncias).pdf).



**Figura 96 - Imagem do holograma de um objeto tridimensional.**

Fonte: REBORDÃO.

Um holograma é um registro que cria uma imagem tridimensional do objeto que lhe deu origem quando iluminado de forma conveniente. Diferentemente da fotografia que registra apenas as diferentes intensidades da luz proveniente do objeto fotografado, os hologramas também registram a fase da onda luminosa oriunda do objeto, o que permite reconstruir uma imagem tridimensional. Para esclarecer o processo de criação do holograma recomendamos a imagem da Figura 97.

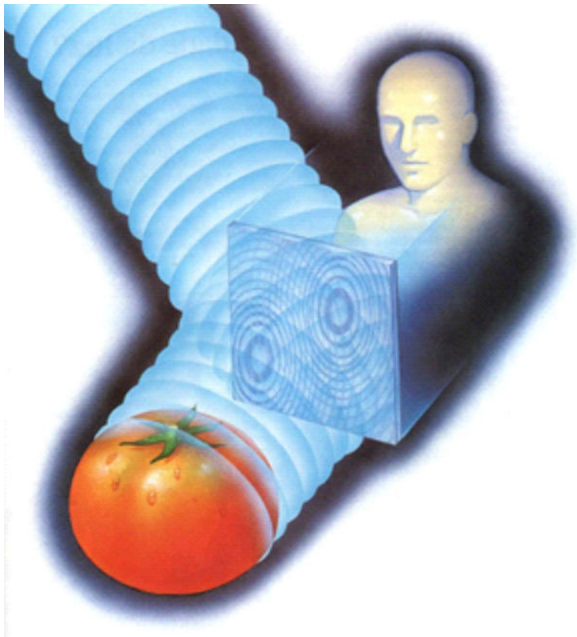
**Figura 97 - Criação do registro holográfico.**

Fonte: Ciência e Natureza: Forças Físicas. 1996. p.124.

Esta figura mostra, de modo simplificado, que o laser é dividido em dois feixes que seguem caminhos diferentes, um deles passa pelo objeto enquanto o outro vai diretamente para a película fotossensível. As franjas de interferência entre os dois feixes são gravadas na película.

Para reproduzir a imagem a partir deste registro, um laser de mesmo comprimento de onda daquele usado na produção do holograma, apresentará difração nas franjas como se atingisse o próprio objeto, permitindo sua visualização tridimensional, como esquematizado na Figura 98.





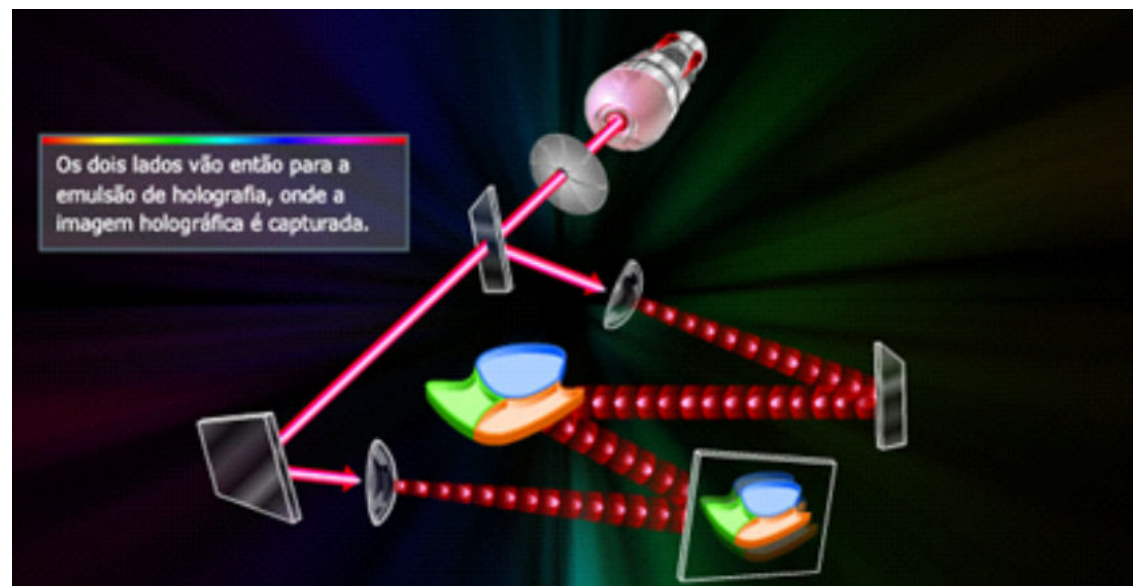
**Figura 98 - Reprodução da imagem holográfica a partir do registro gravado.**

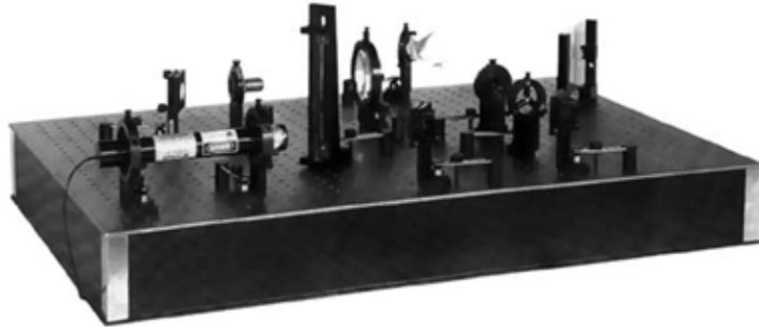
Fonte: Ciência e Natureza: Forças Físicas. 1996. p.125.

Para dar maior visibilidade ao processo de criação do registro, pode ser apresentada aos alunos a animação disponível em <http://www.tecmundo.com.br/holografia/4343-holografia-o-3d-ja-esta-com-os-dias-contados-.htm>. Caso você tenha acesso à internet durante a aula, a projeção pode ser feita diretamente do site, mas se o acesso não for possível uma sugestão é copiar as imagens através da tecla Print Screen (PrtSc) e colar na apresentação, como fizemos e está mostrado nos slides 11 a 17 da Figura 94. A imagem final da animação é mostrada na Figura 99.

**Figura 99 - Imagem final da animação sobre a criação do registro holográfico.**

Na projeção das Figuras 97 e 99, é recomendável que seja feita a análise da diferença de caminho percorrido pela luz que levará ao registro das franjas de interferência. É esperado que os estudantes perguntem por que não são feitos hologramas em aula experimental na escola. Uma forma de esclarecer que o processo não é tão simples e





demanda equipamentos, como espelhos e lentes, além de uma bancada fixa, é mostrar a imagem da Figura 100. Esta imagem mostra uma montagem utilizada em laboratórios de pesquisas como no Laboratório de Óptica da Unicamp e foi extraída de <http://www.ifi.unicamp.br/~dfigueir/holosite/holografia/holografia.htm>.

**Figura 100 - Montagem para criação de hologramas em laboratório de pesquisa.**

Outra pergunta esperada dos estudantes é sobre os shows que mostram artistas que já faleceram ou que nem existem realmente de forma supostamente holográfica. Um dos casos mais conhecidos é o do rapper Tupac Shakur, morto em 1996 e que apareceu em show com Snoop Dog em um festival em 2012. Uma imagem do show, extraída de <http://www.musicaparamusica.com.br/post/como-foi-feito-o-holograma-do-tupac/139>, é apresentada na Figura 101.

**Figura 101 - Snoop Dog (à esquerda) em show com suposto holograma de Tupac (à direita).**

Outro caso é o de Hatsune Miku, popstar japonesa criada virtualmente, que arrasta multidões para seus shows em várias cidades do Japão. A Figura 102, extraída de <http://revistagalileu.globo.com/Revista/Common/0,,EMI187440-17770,00-HOLOGRAMA+D+E+POPS-TAR+NO+JAPAO.html> mostra imagem da cantora, bem como de seus fãs que agitam barras luminosas durante o show como se a artista pudesse vê-los.



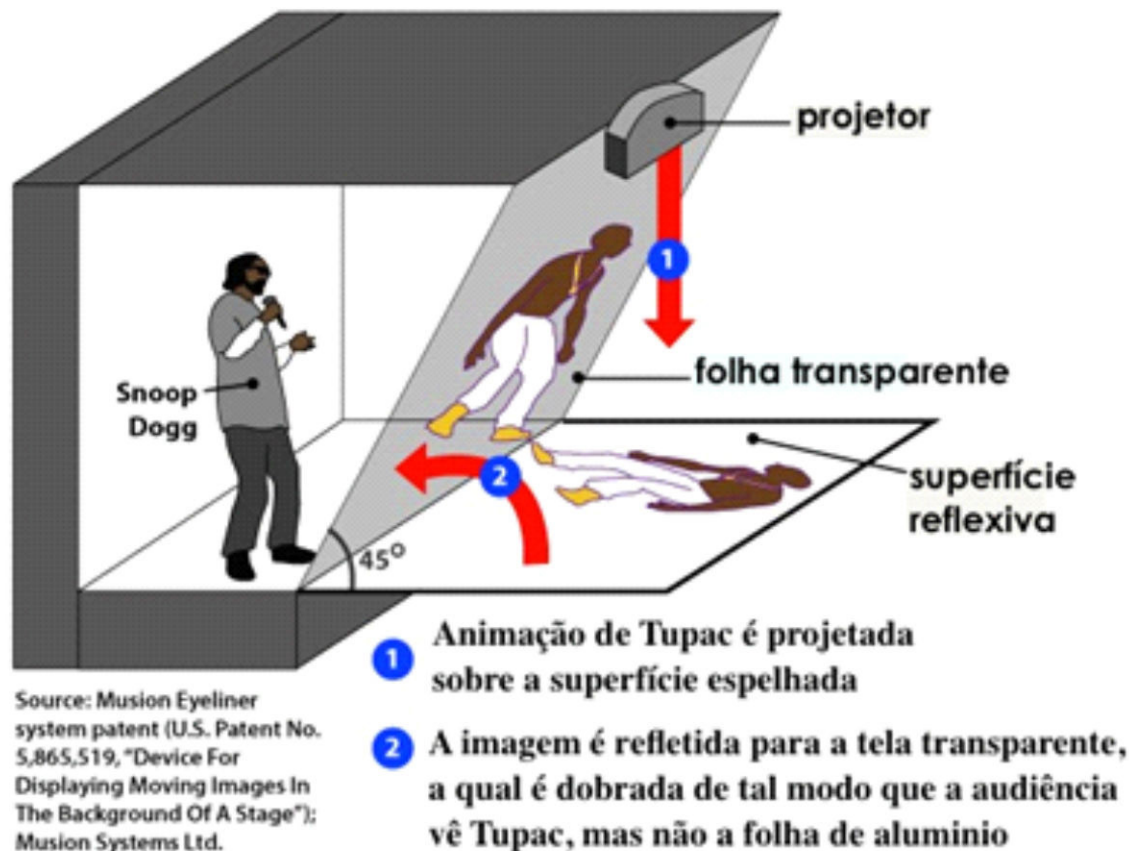
Figura 102 - Popstar japonesa criada virtualmente.



No caso do primeiro show citado, é evidente que não se trata realmente de um holograma, uma vez que é facilmente encontrada em muitos endereços na internet, a forma de criação da imagem do cantor, que consta da projeção da luz sobre um espelho e sua posterior reflexão para uma tela transparente que está inclinada a  $45^\circ$  da horizontal de forma que o público veja a imagem nela refletida mas não perceba sua existência, como mostra a Figura 103. Uma forma de se certificar que a imagem não é holográfica, neste caso, é que a mesma não apresenta

formação tridimensional, mas apenas uma projeção plana na tela, sua posição cria a ilusão da presença do artista no palco.

Figura 103 - Forma de criação do suposto holograma do rapper Tupac em show.



Source: Musion Eyeliner system patent (U.S. Patent No. 5,865,519, "Device For Displaying Moving Images In The Background Of A Stage"); Musion Systems Ltd.

Para o caso da artista japonesa, não encontramos explicações de como é criada, mas, uma forma de testar se a imagem é ou não holográfica, seria observá-la de vários ângulos distintos, pois um holograma de fato traria a percepção de presença quando observado por todos os lados inclusive de perto do palco.

De acordo com José Joaquín

Lunazzi, professor de física da Unicamp e dono de duas patentes em aplicações de telas holográficas, esses shows não deveriam ser chamados holográficos, pois são apenas “projeções ordinárias em telas translúcidas, quase transparentes. Ou reflexos em vidro fino de uma TV que está no chão” e “Quem senta perto vê logo a diferença.” (<http://gizmodo.uol.com.br/cazuza-holografia/>). Parte da confusão de nomear tais projeções como holograma está na própria origem do termo, que é bastante ampla, diz o professor de física da Universidade de São Paulo, Mikya Muramatsu. O registro do todo, já que “Holo” seria todo; e “grafia”, registro.

Ainda de acordo com a matéria disponível em <http://gizmodo.uol.com.br/cazuza-holografia/> a holografia só deve se tornar possível e popular com o desenvolvimento da nonoeletrônica em 10 anos ou mais. Aí sim poderíamos ver a verdadeira imagem holográfica: com profundidade, visão lateral completa e sem precisar de qualquer acessório como óculos. Por enquanto, os falsos hologramas devem servir como alternativa aos verdadeiros.

## Referências

ALVES FILHO, J.P.; PINHEIRO, T. F.; PIETROCOLA, M. **A eletrostática como exemplo de transposição didática**. In: PIETROCOLA, M. (org). Ensino de Física: conteúdo metodologia e epistemologia em uma concepção integradora. São Carlos. Editora da UFSC. 2001.

ASSIS, A. K. T. Newton e suas grandes obras: O Principia e o Óptica. **11º COLE (Congresso de Leitura do Brasil)**. Unicamp. Campinas. p. 37-58, 1998.

BAGNATO, V. S.; PRATAVIEIRA, S. Luz para o progresso do conhecimento e suporte da vida. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. v. 37, n. 4, 4206, 2015.

BRASIL. **Ministério da Educação. Secretaria de Educação Básica**. Ciências da natureza, matemática e suas tecnologias. v. 2. Brasília: 2006.

\_\_\_\_\_. **Ministério da Educação. Secretaria de Educação Média e Tecnológica**. Parâmetros Curriculares Nacionais (Ensino Médio). Brasília: MEC, 2000.

\_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. PCN+ Ensino Médio: Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais - Física. Brasília: MEC, 2000.

- CARDOSO, S. O.; DICKMAN, A. G. Simulação Computacional Aliada à Teoria da Aprendizagem Significativa: uma ferramenta para ensino e aprendizagem do efeito fotoelétrico. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 29, n. Especial 2: p. 891-934, out. 2012.
- CARUSO, F. OGURI, V. **Física Moderna: Origens clássicas e fundamentos quânticos**. Rio de Janeiro. 2ª Reimpressão. Elsevier, 2006.
- CARVALHO, S. H. M. **Einstein – Uma Luz sobre a Luz**. 2005. Disponível em: <http://fisica.cdcc.usp.br/Professores/Einstein-SHMCarvalho/Einstein-SHMCarvalho.pdf>. Acesso em 20 de janeiro de 2015.
- Ciência e Natureza: Forças Físicas. Pedro Paulo Poppovic Consultores Editoriais. Rio de Janeiro – Abril Coleções. 1996.
- CHAVES, A. S. **Física: ondas, relatividade e física quântica**. vol. 3. Rio de Janeiro: Ed. Reichmann & Affonso. 2001.
- CORDEIRO, M. D.; PEDUZZI, L. O. Q. Consequências das descontextualizações em um livro didático: uma análise do tema radioatividade. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 35, n. 3, p. 1-11. 2013.
- FEYNMAN, R. P.; LEIGHTON, R. B.; SANDS, M. **Lições de Física: edição definitiva**. Porto Alegre: Bookman, 2008.
- FORATO, T. C. M. **A natureza da ciência como saber escolar: um estudo de caso a partir da história da luz**. 2009. v2. 222 f. Tese (Doutorado em ensino de ciências e matemática) – Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2009.
- GICOREANO, J. P.; PACCA, J. L. A. O ensino da óptica na perspectiva de compreender a luz e a visão. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física** 18(1), p. 26-40, Abr. 2001.
- GIRCOREANO, J. P. **O Ensino de Óptica e as Concepções sobre Luz e Visão** (Dissertação de Mestrado, São Paulo, FEUSP, 1997).
- GREF. Física 2. 5ª ed. 1ª reimpr. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2002.
- HALLIDAY, D., RESNICK, J. W. **Fundamentos de Física, volume 4: óptica e física moderna**. 8ª Ed. Tradução e revisão técnica: Ronaldo Sérgio de Biasi – Rio de Janeiro: LTC, 2009.
- KANTOR, C. A. et al. **Quanta Física**. 3 volumes. 1ª ed. São Paulo: PD, 2010.
- KARAM, R. A. S. **Estruturação matemática do pensamento físico no ensino: uma ferramenta teórica para analisar abordagens didáticas**. (Tese de doutorado em Ensino de Ciências e Matemática. Faculdade de Educação da Universidade de São Paulo. 275 p. São Paulo, 2012).

- MOREIRA, M. A. A teoria dos campos conceituais de Vergnaud, o ensino de ciências e a pesquisa nesta área. **Investigações em Ensino de Ciências** – 7(1), p. 7-29, 2002.
- NOGUEIRA, C. M. I., REZENDE, V. A Teoria dos Campos Conceituais no Ensino de Números Irracionais: Implicações da Teoria Piagetiana no Ensino de Matemática. **Revista Eletrônica de Psicologia e Epistemologia Genéticas**. Volume 6 Número 1 – Jan-Jul/2014.
- NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica**. 1ª Ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1998.
- PIETROCOLA, M. A Matemática como Estruturante do Conhecimento Físico. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**. v.19, n. 1, p. 89-109, 2002.
- PIETROCOLA, M. **Inovação curricular em física: transposição didática e a Sobrevivência dos saberes**. Trabalho apresentado em mesa redonda no Encontro de Pesquisa em Ensino de Física. Curitiba. 2008.
- REBORDÃO, J. M. Holografia: Física e aplicações. Colóquio de Ciências.
- REZENDE JÚNIOR, M. F., 2006. **O processo de conceitualização em situações diferenciadas na formação inicial de professores de física**. Tese de doutorado, UFSC, Florianópolis. 2006.
- RODRIGUES NETO, G. Euclides e a geometria do raio visual. **Scientiæ Dia**. v. 11, n. 4, p. 873-92, São Paulo, 2013.
- SALVETTI, A. R. **A História da Luz**. 2 ed. São Paulo. Editora Livraria da Física, 2008.
- TAUCEDA, K. C., DEL PINO, J. C. Processos cognitivos e epistemologias da teoria dos campos conceituais de Gérard Vergnaud, do ensino narrativo e do aprender a aprender. **Ciências & Cognição** 2014; Vol 19(2) 256-266 <http://www.cienciasecognicao.org>.
- VERGNAUD, G. **La teoría de los campos conceptuales**. **Recherches en Didáctique des Mathématiques** 10 (2, 3), p. 133-170, 1990.
- YOUNG, H. D., FREEDMAN, R. A. **Física IV: ótica e física moderna**. São Paulo: Addison Wesley, 2008.