

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

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

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.

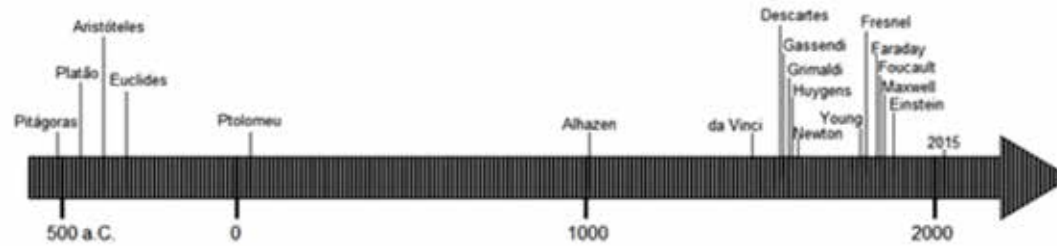
É importante incentivar a liberdade de expressão e o respeito entre os alunos durante a realização das atividades, promovendo um ambiente onde o aluno se sinta confortável para fazer perguntas e dar opiniões, enfim, participar ativamente das aulas.

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-KWZ4pgvMISNW1jMUpvdzJtZEk/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.

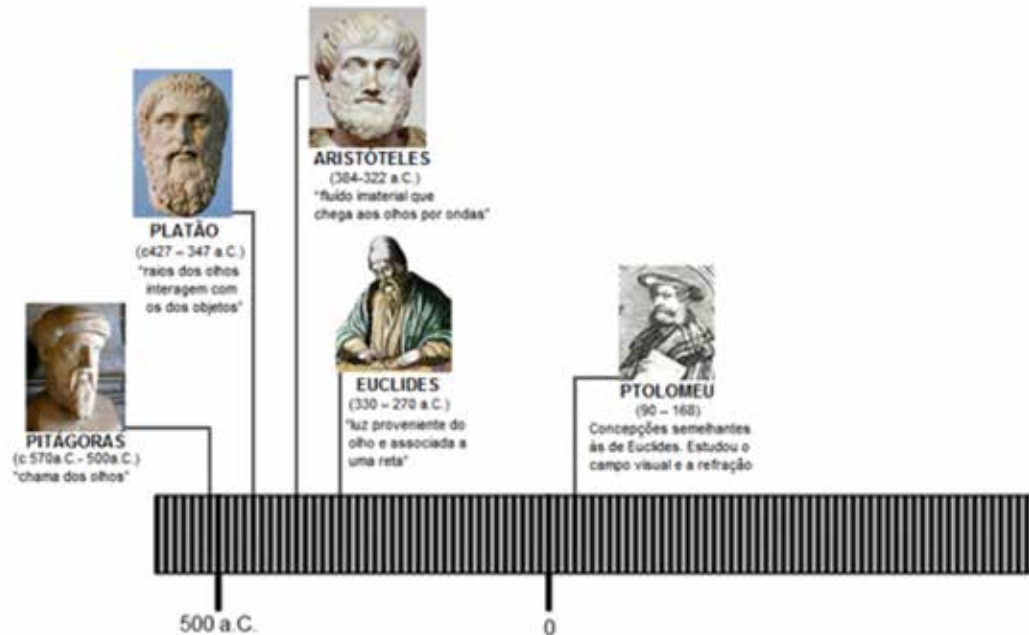
Figura 1 - Linha do tempo.



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.

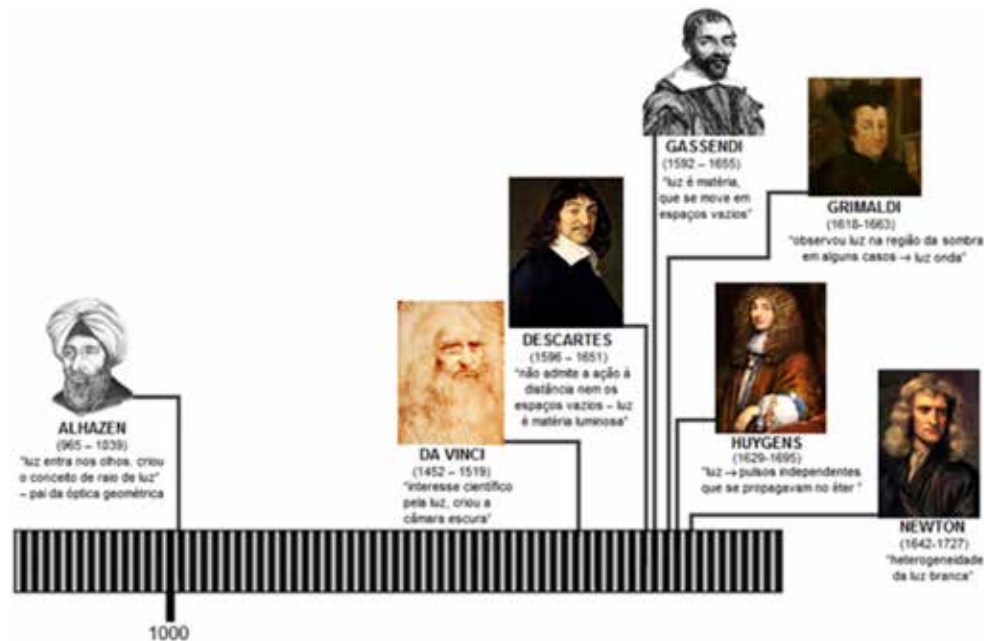


Fonte: As fotos usadas foram obtidas de <https://pt.wikipedia.org/wiki/>.

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 emanção dos objetos na presença da luz solar.

Para Aristóteles (384-322 a.C.), a luz seria uma espécie de fluido 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.

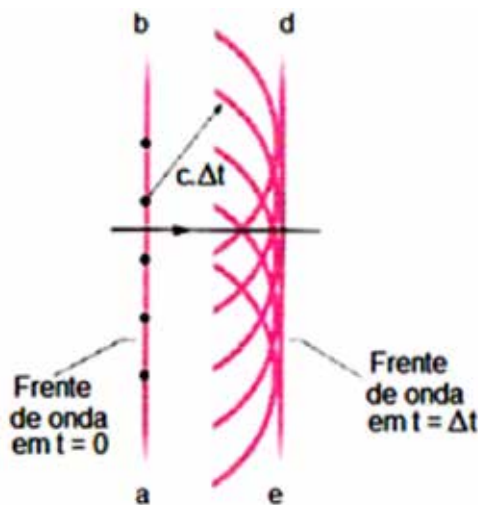
Em 1655, surge um fenômeno interessante dos experimentos do padre Francesco Grimaldi (1618-1663). Ele observou que havia luz na região da sombra geométrica de um objeto delgado, provocada por uma forte luz ao atravessar um pequeno orifício. Ele chamou o fenômeno de difração (a luz se fraciona em duas 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 fluido 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).

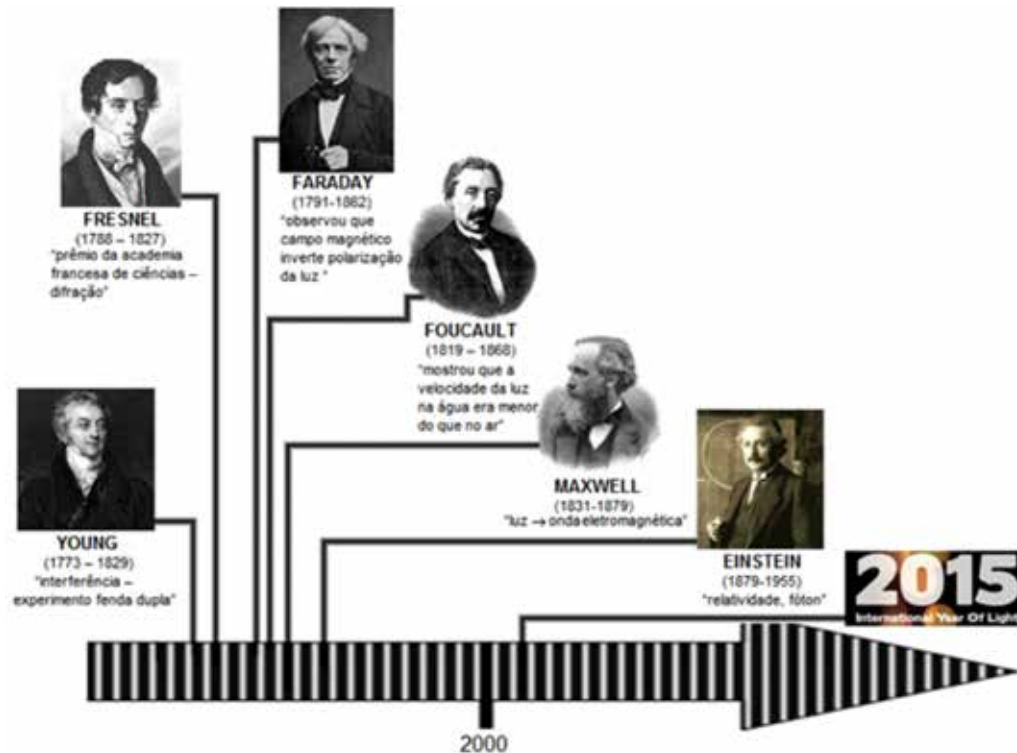
Figura 4 - Propagação de uma onda plana no vácuo de acordo com o princípio de Huygens.



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.

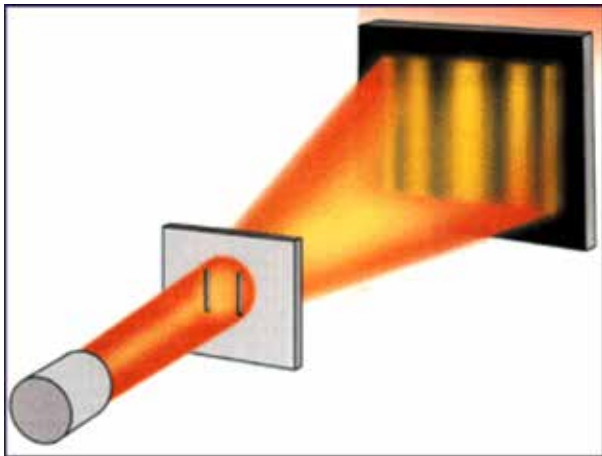


Figura 6 - Representação da experiência de Young com duas fendas estreitas entre a fonte de luz e o anteparo.

Fonte: <http://www.passeinaufgrs.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/pt/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 FÍSICA	Professora SAMIA	Série / Turma 2º ___	Data / / 2015
---------------	-----------------------------	----------------------------	-------------------------	------------------

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.

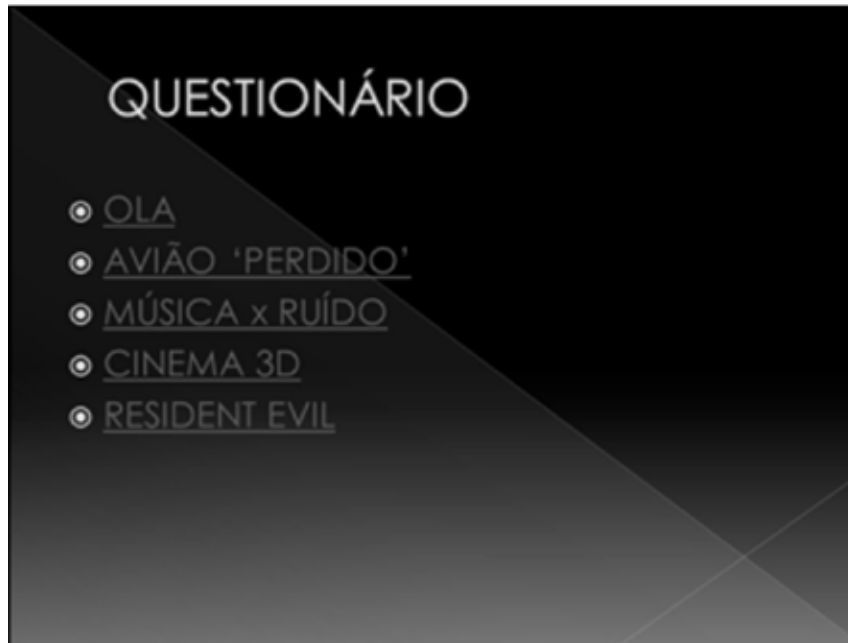
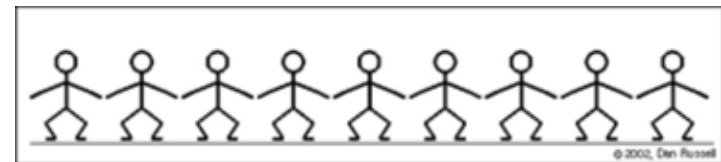


Figura 8 - Apresentação multimídia para retomar as perguntas do questionário.

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.

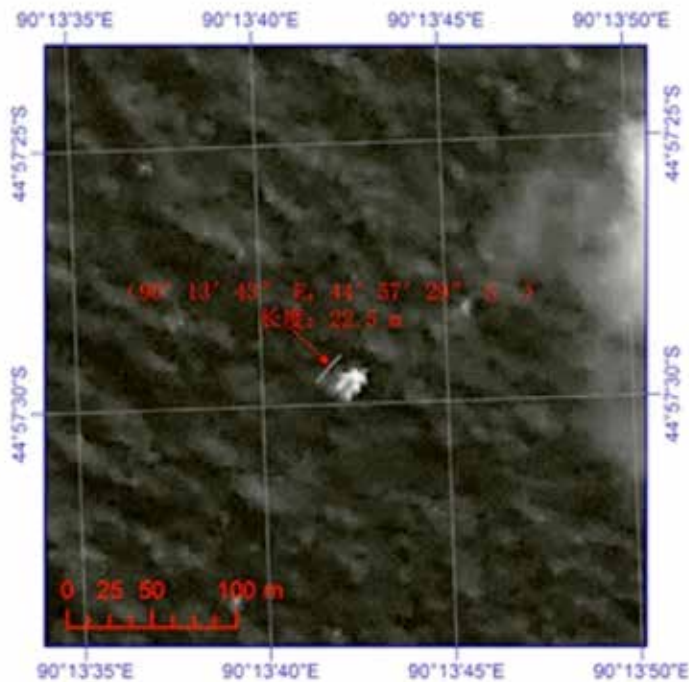
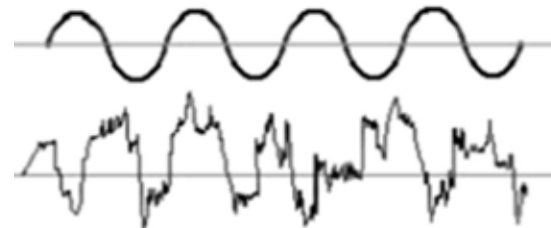


Figura 10 - Imagem de satélite chinês com possível parte do avião desaparecido.

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/>



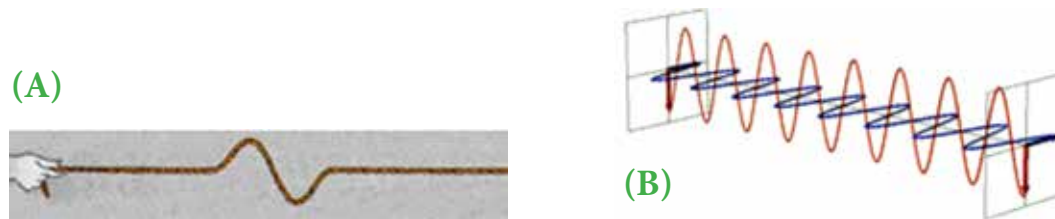
Para mostrar aos alunos a cena do filme *Resident Evil 3: a extinção*, citada no questionário, sugerimos a locação do mesmo.

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>.

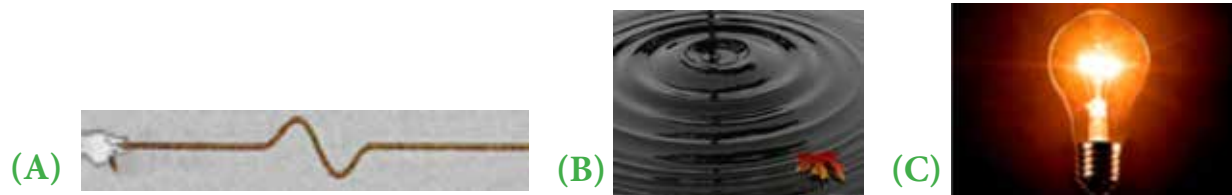
Figura 14 - Aspecto das animações sobre ondas (A) transversais e (B) longitudinais.



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/>.

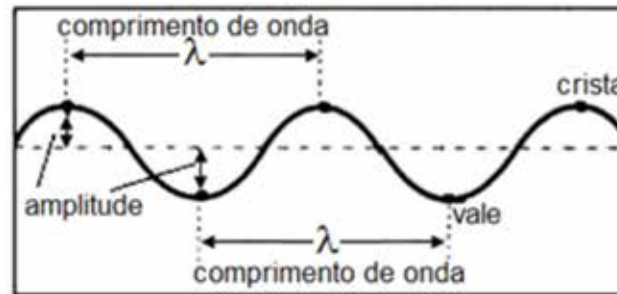
Fonte C: <http://www.conscienciaampla.com.br/2014/01/27/qual-o-melhor-tipo-de-lampada/>.

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 Δt 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.

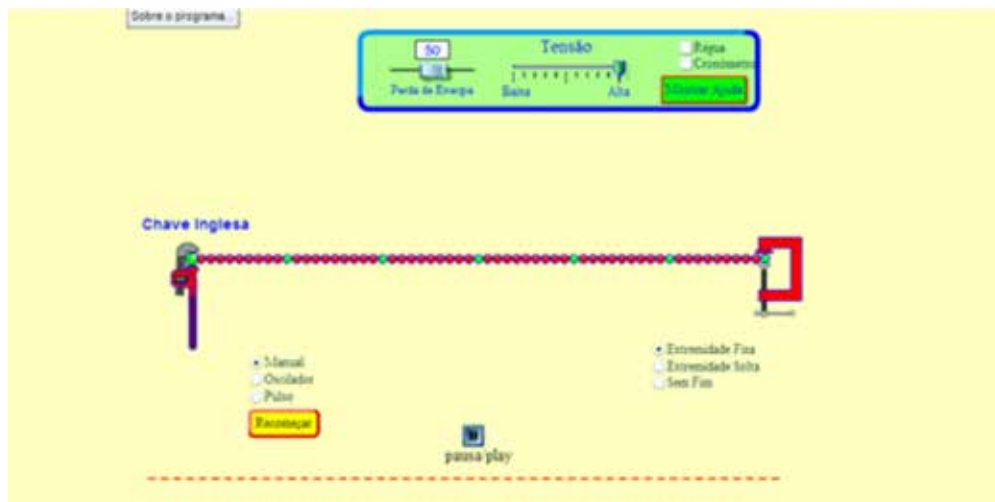


Figura 17 - Tela inicial da simulação Onda em uma Corda.

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.

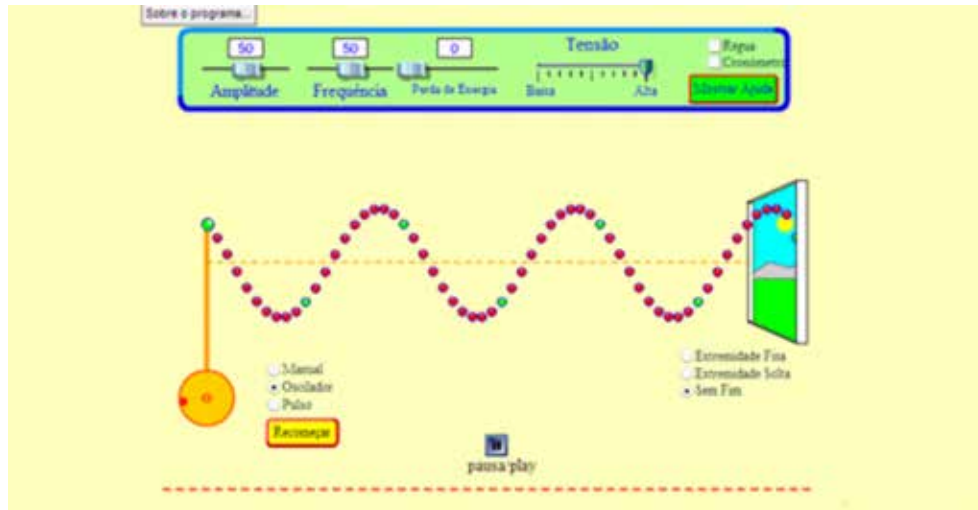


Figura 18 - Simulador configurado para oscilador automático, extremidade sem fim e perda zero de energia.

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.

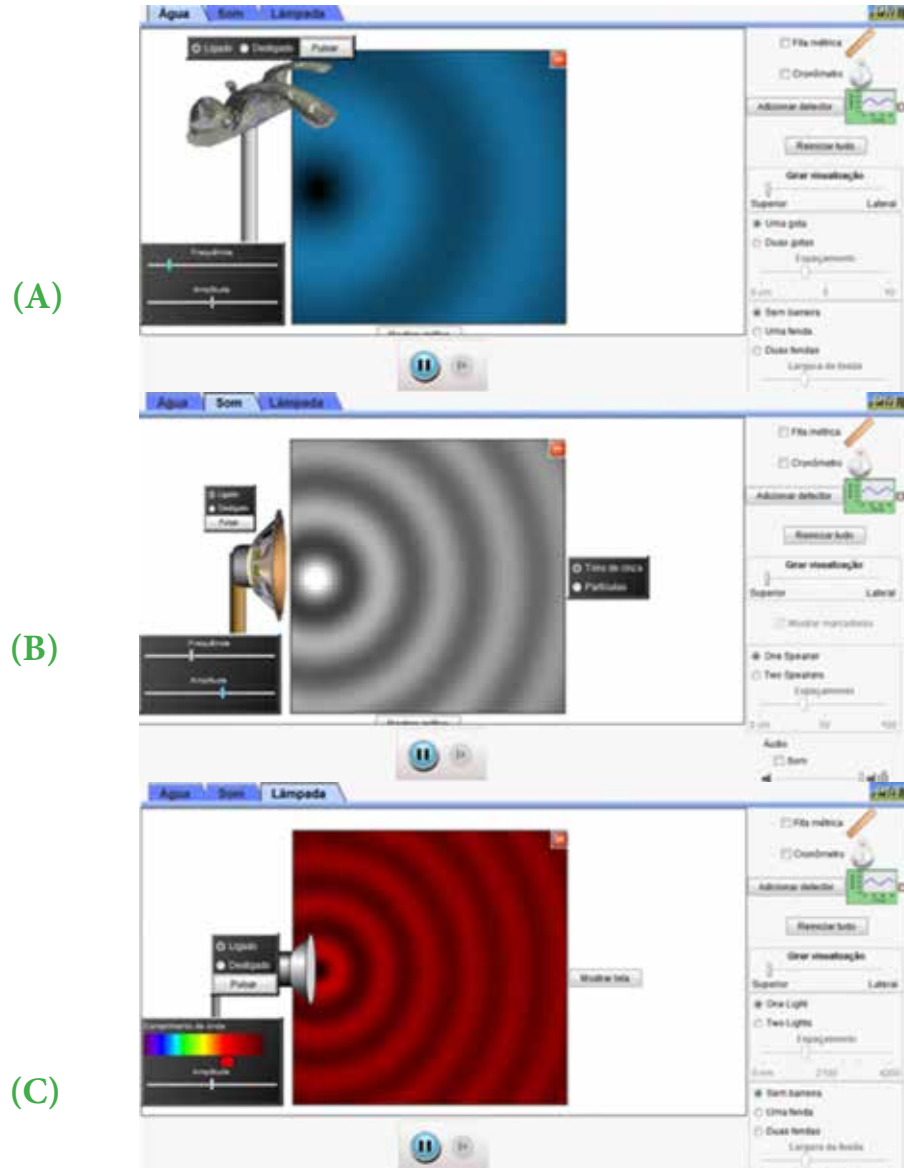
A seguir, você pode explorar a função de modificar a tensão na corda e como a velocidade da onda se modifica com sua alteração. Vale destacar, também, que os pontos verdes da corda permitem observar que cada um oscila na vertical sem deslocamento horizontal, verificando que a onda não transporta matéria.

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.

Passa 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-

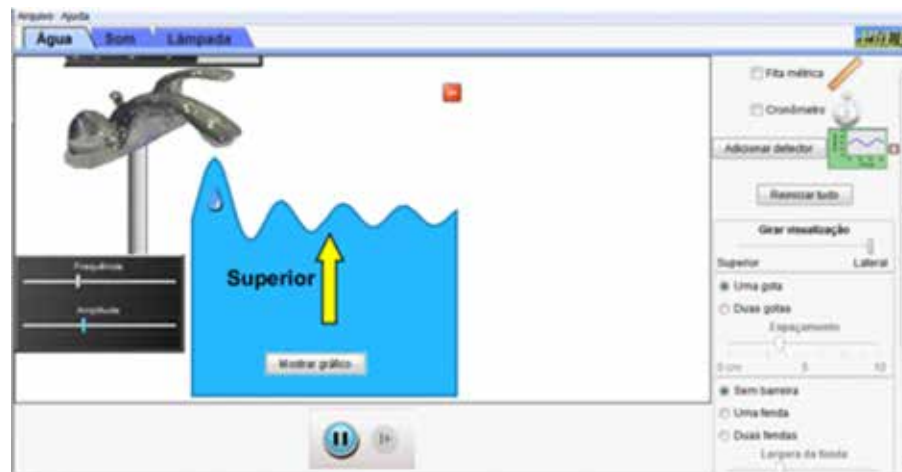
rão explorados todos os seus recursos, que serão utilizados ao longo das aulas.

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 ΔS é o deslocamento da onda no intervalo de tempo Δt .

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

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:

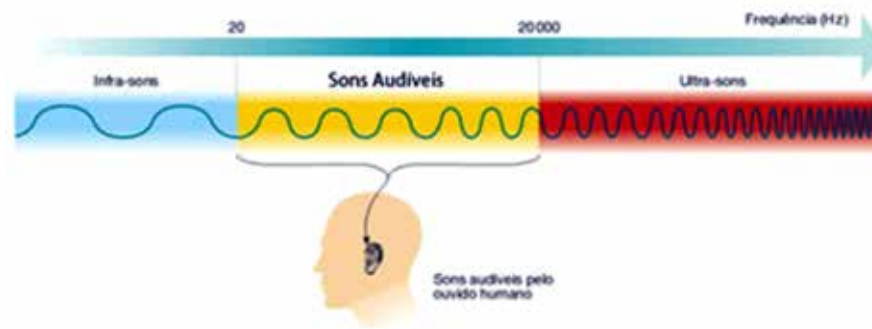
$$v = \frac{\lambda}{T}$$

$$v = \lambda \cdot f$$

A qual é chamada de equação fundamental da ondulatória e relaciona a velocidade v de propagação da onda com seu comprimento λ 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.

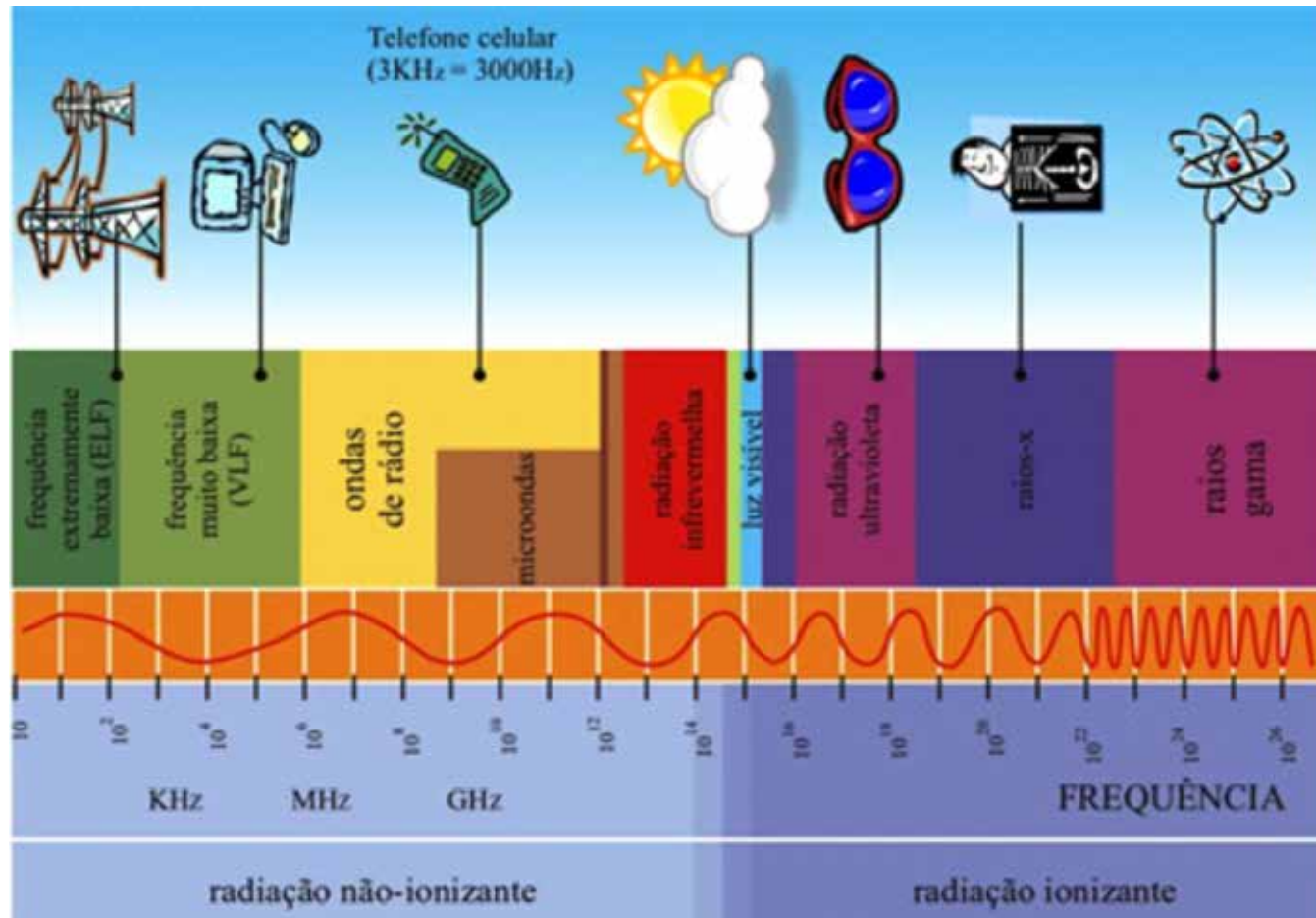


Fonte: http://www.aulas-fisica-quimica.com/8f_07.html.

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

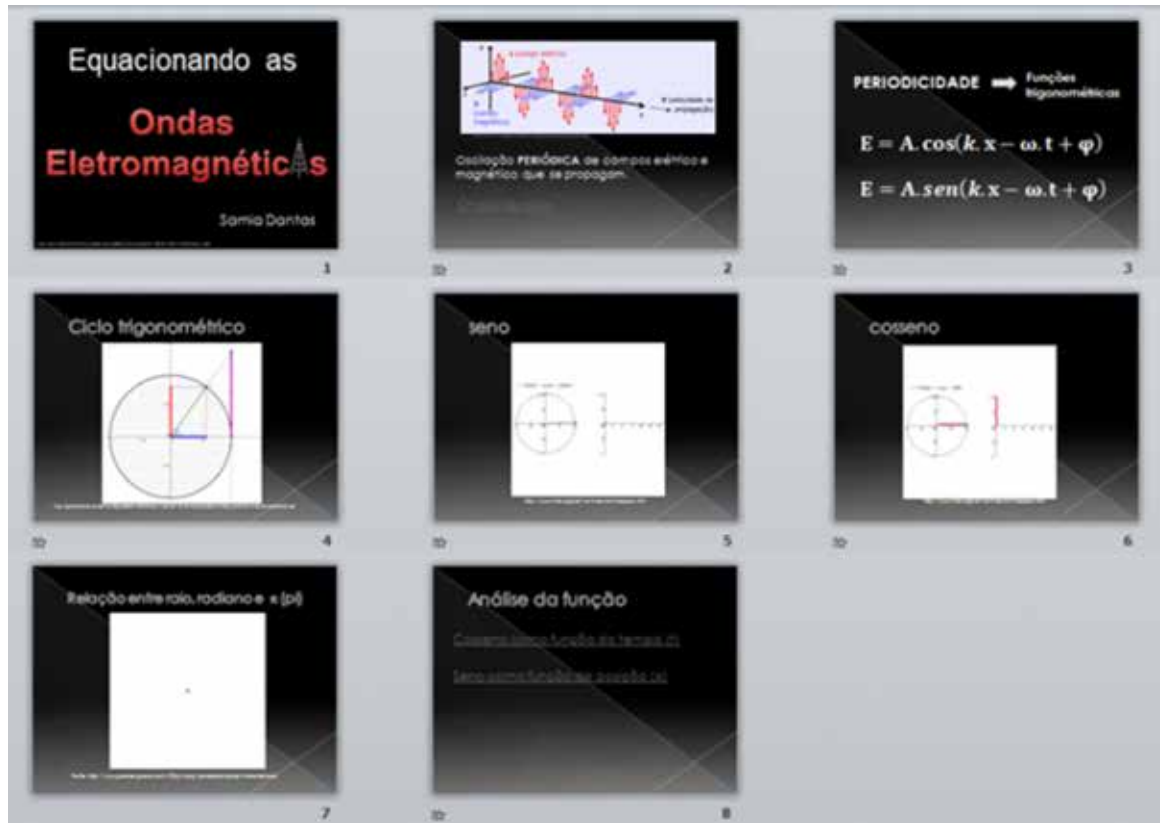
É comum que os estudantes acreditem que todas as radiações sejam ionizantes. Seria interessante, nesse momento, distinguir radiações ionizantes e as não-ionizantes.

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.

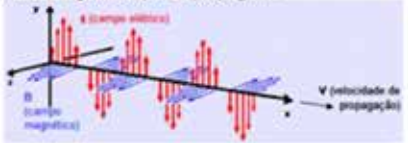
Para acompanhar a atividade, sugerimos que cada

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

Atividade **Uso do software MODELLUS** Disciplina **FÍSICA** Professora **ΣAMIA** Série/Turma **2º** Data **/ / 2015**

Aluno(a) e número

1) As ondas eletromagnéticas, representadas na figura abaixo, são formadas pela oscilação periódica de campos elétrico e magnético que se propagam.



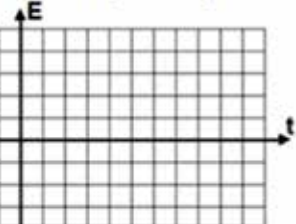
Devido à periodicidade desses campos, podemos usar funções trigonométricas para representá-los.

Nas equações é possível perceber a propagação no espaço () e a variação no tempo ().

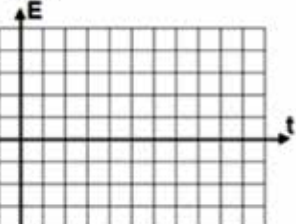
2) Observação da simulação "ondas de rádio"
A propagação da onda no espaço é representada pela _____ enquanto a variação do campo no tempo é ilustrada pelos _____.

3) Primeiro contato com o software Modellus.

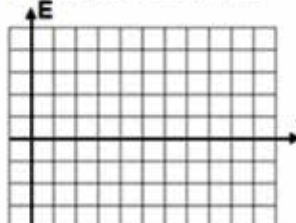
- **Represente**, no espaço abaixo, o gráfico gerado pelo software para a equação $E = \cos(t)$. Identifique a **amplitude** e o **período** do gráfico.



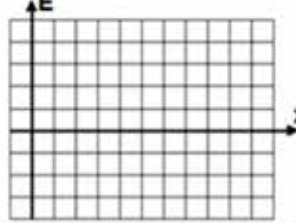
- Com a modificação da equação para $E = 3 \cos(t)$, repita os passos pedidos acima (representação, amplitude e período).



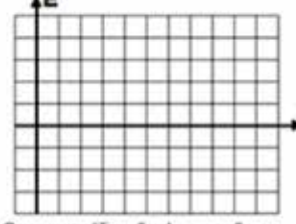
- Com a modificação da equação para $E = 3 \cos(2t)$, repita os passos pedidos anteriormente.



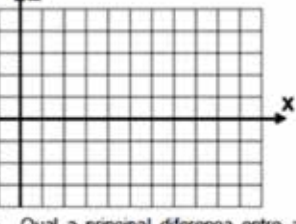
- Agora, faremos a análise da função cosseno em função da posição x. **Represente**, no espaço abaixo, o gráfico gerado pelo software para a equação $E = \sin(x)$. Indique a **amplitude** e o **comprimento de onda**.



- Com a modificação da equação para $E = 3 \sin(x)$, repita os passos pedidos acima.



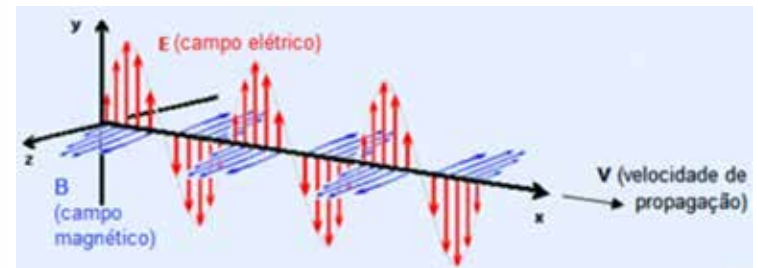
- Com a modificação da equação para $E = 3 \sin(2x)$, repita os passos pedidos anteriormente.



- Qual a principal diferença entre as funções seno e cosseno?

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/>

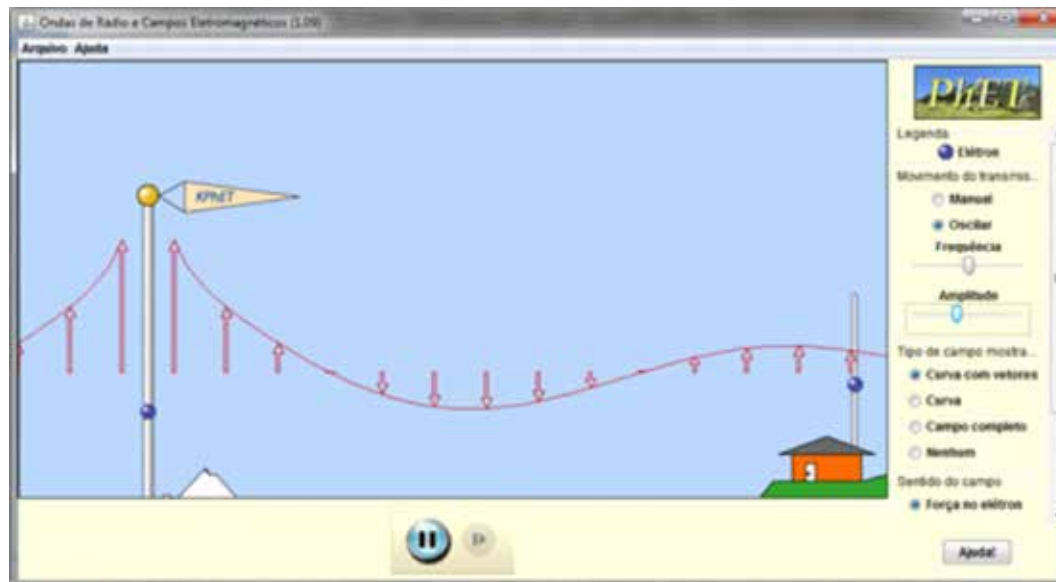
Sabendo que a onda eletromagnética é formada pela oscilação de campos elétrico e magnético e, que ambos apresentam a mesma periodicidade em planos distintos, é suficiente escrever a equação para um deles, neste caso mostramos a equação do campo elétrico E e do campo magnético B, que podem ser expressos 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 ωt corresponde à oscilação temporal e o termo ϕ 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, 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.

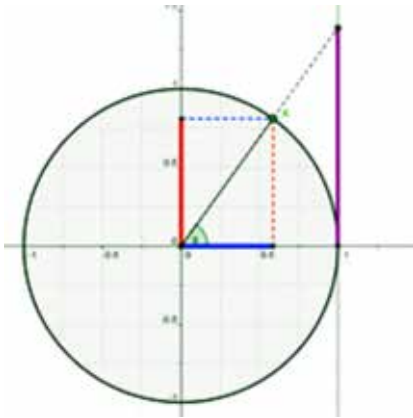


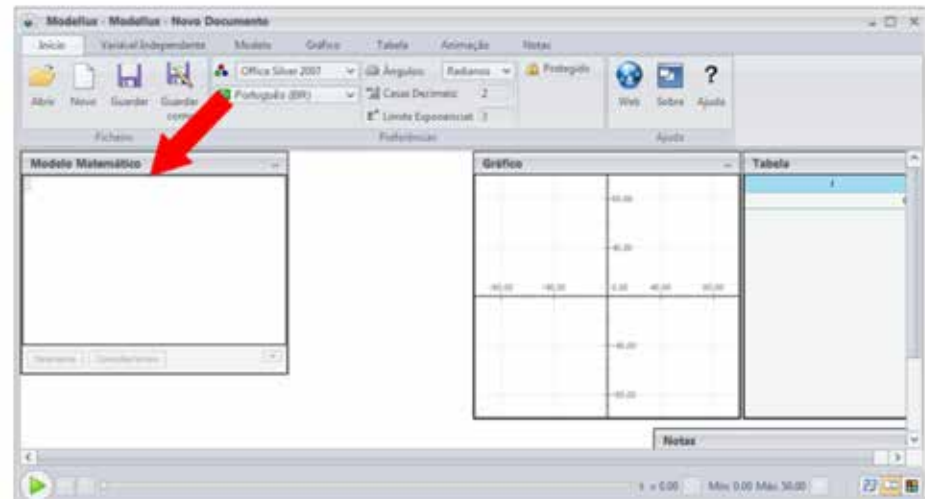
Figura 27 - Animação sobre o ciclo trigonométrico.

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 π 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 λ e q para o ϕ .

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.

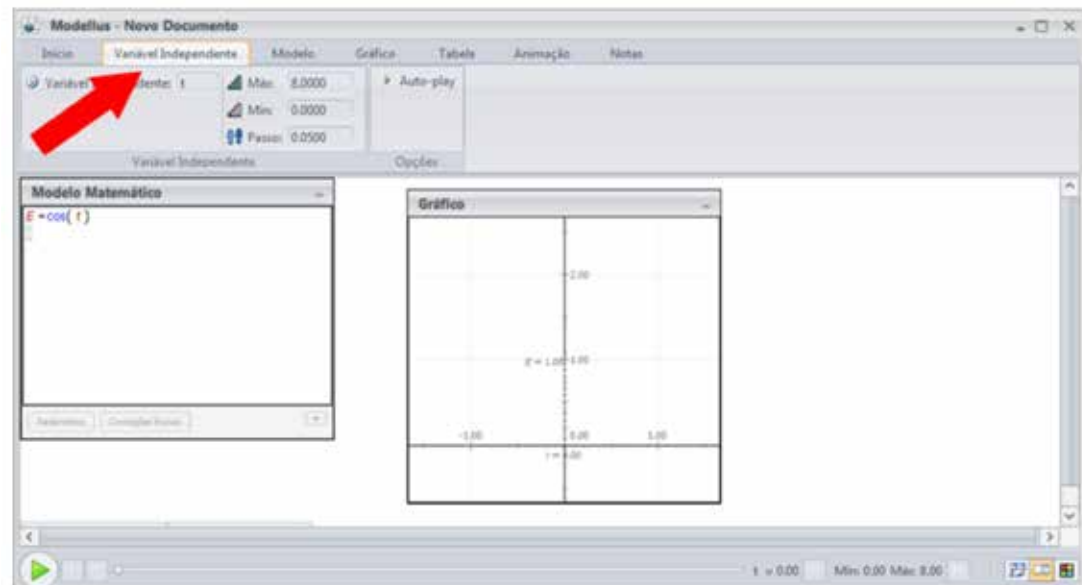
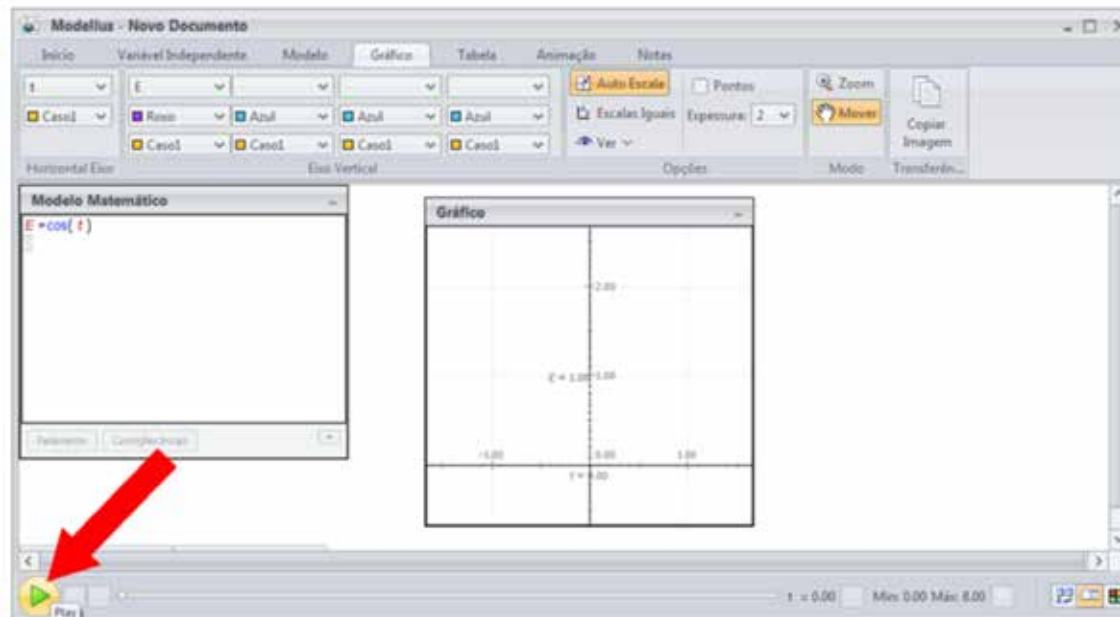
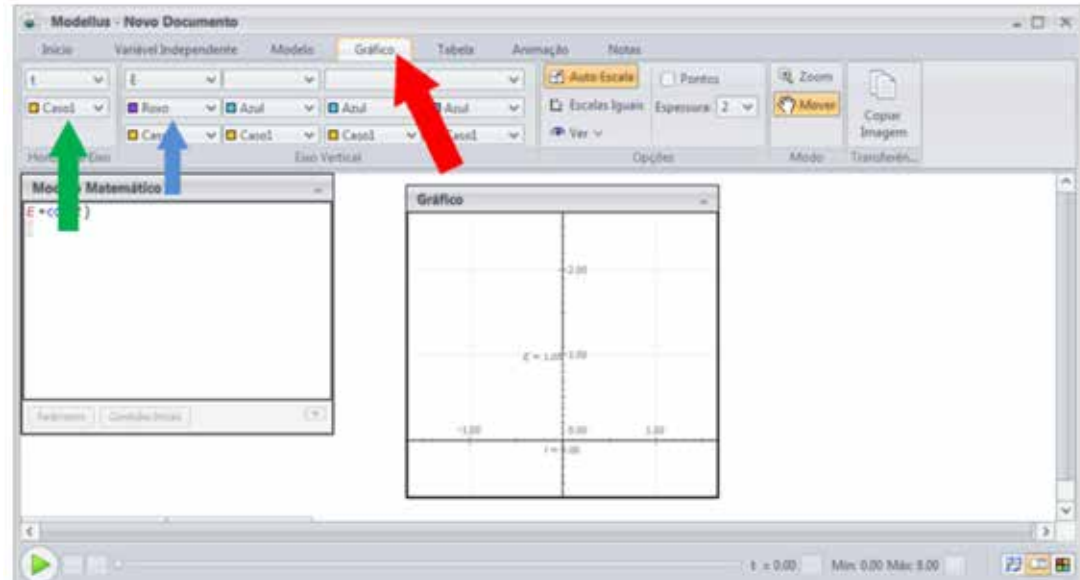


Figura 30 - Aba Gráfico.

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.



tos 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.

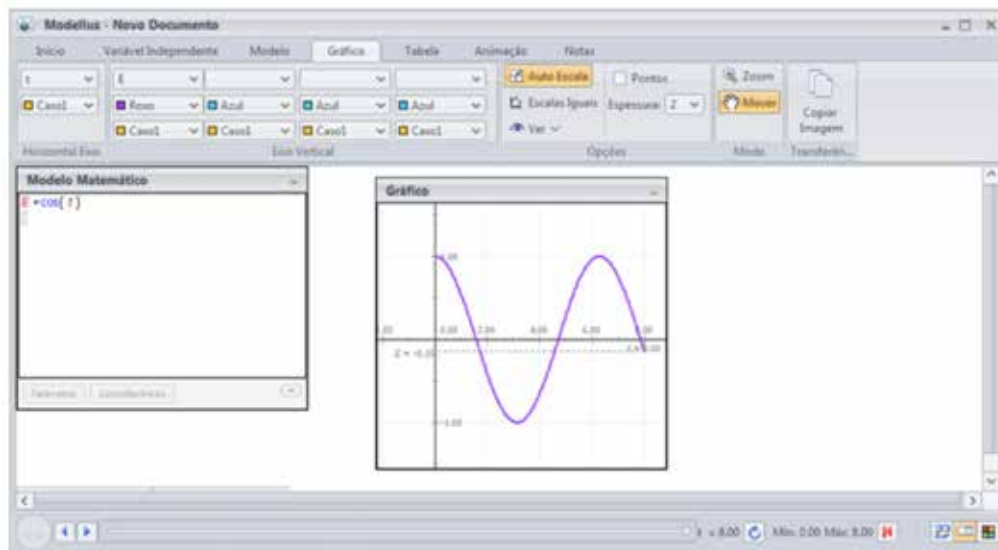


Figura 32 - Gráfico desenhado pelo software Modellus para a expressão $E = \cos(t)$ para o intervalo $0 \leq t \leq 8$ ”.

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.

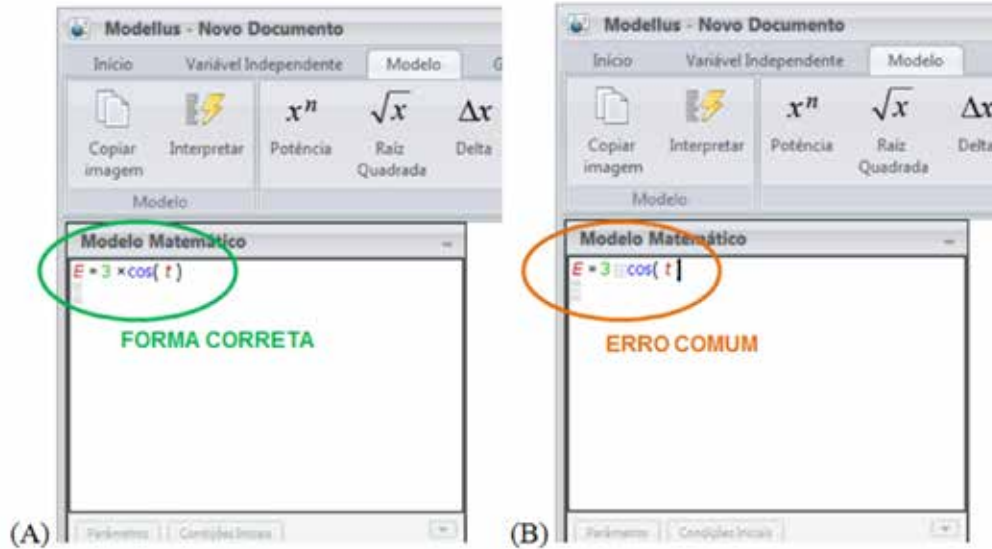
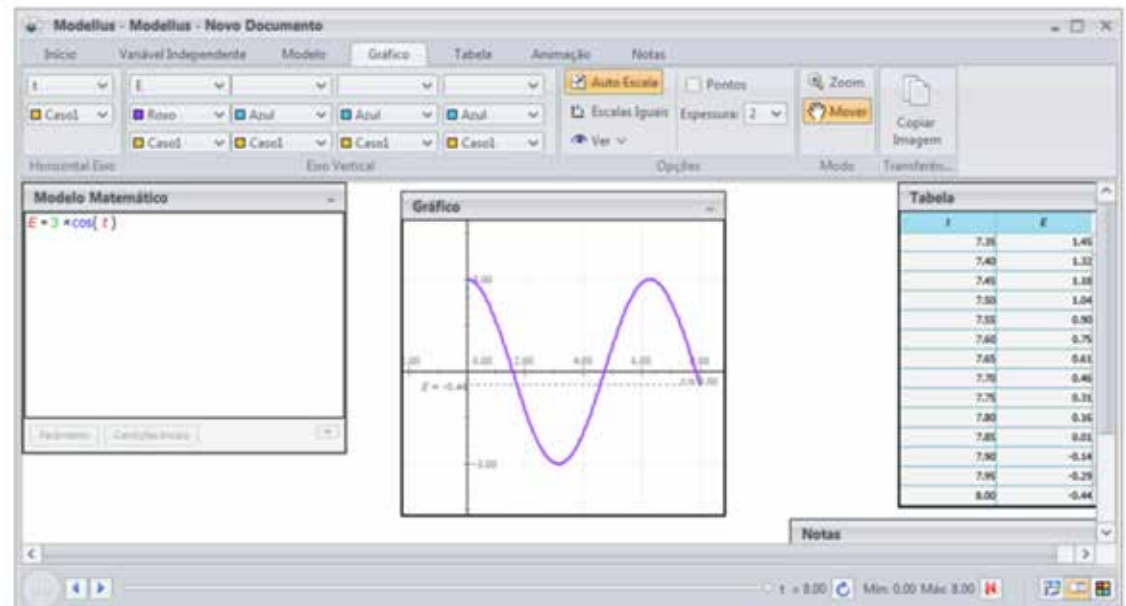


Figura 33 - Forma correta e erro comum ao inserir a equação na janela modelo matemático

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.

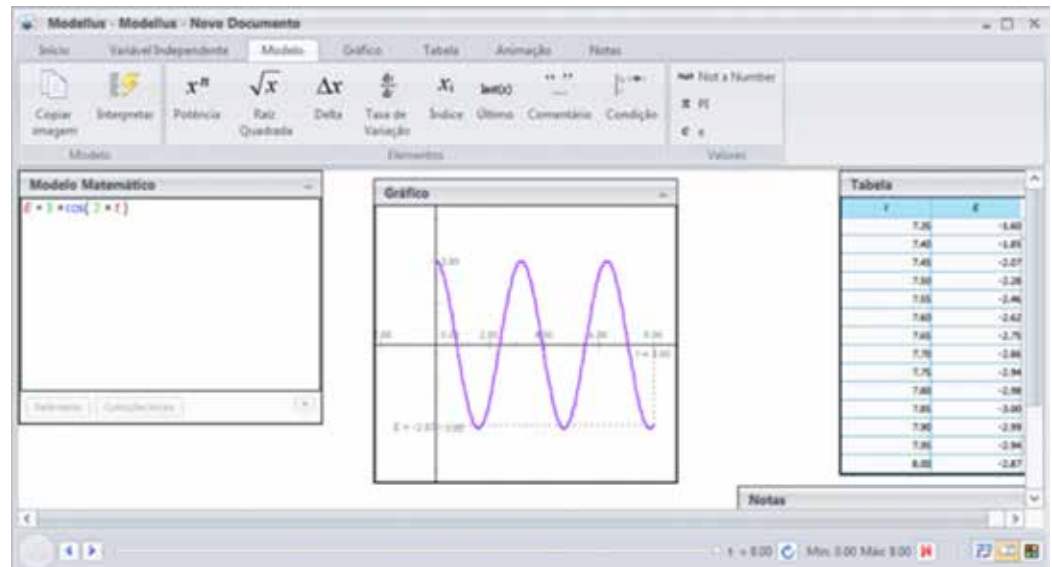
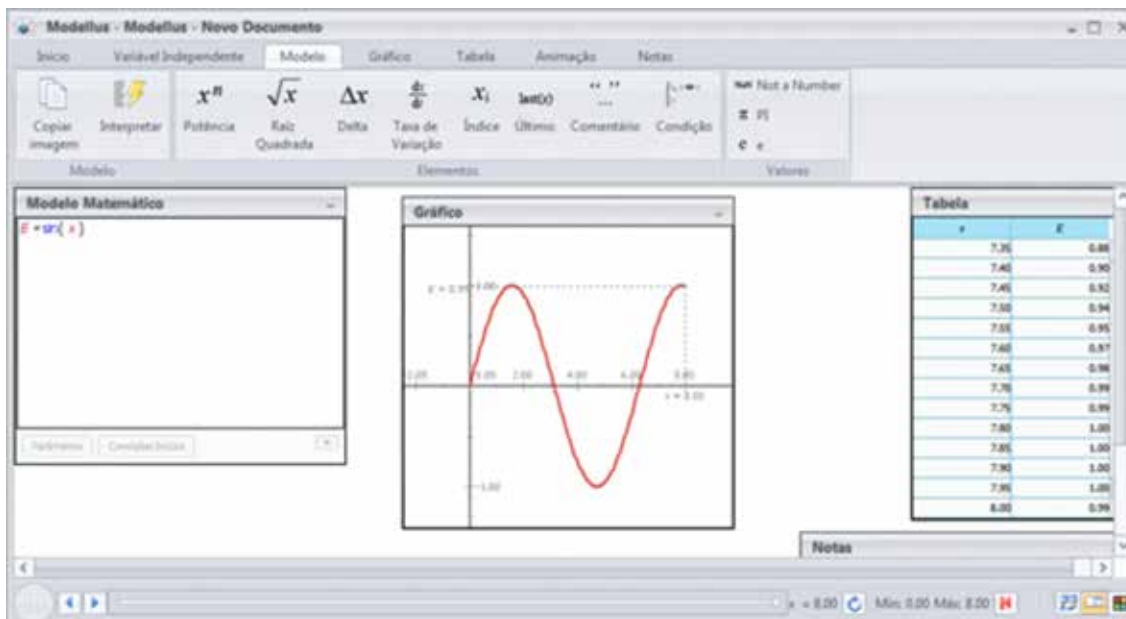


Figura 36 - Gráfico gerado pelo software Modelus para a equação $E = \sin(x)$.

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.

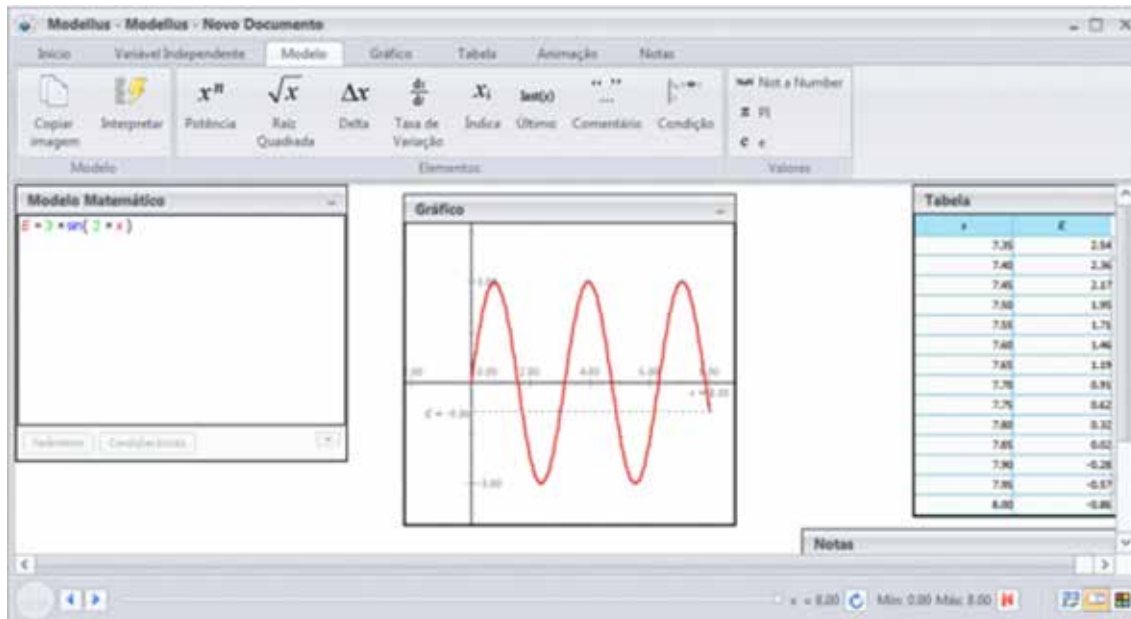
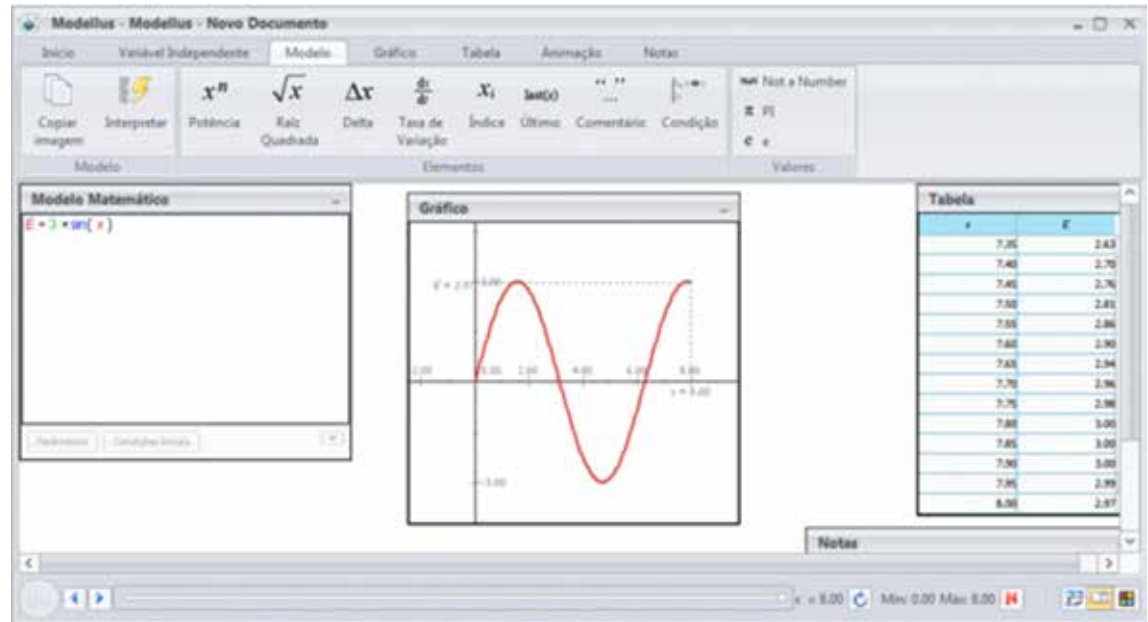


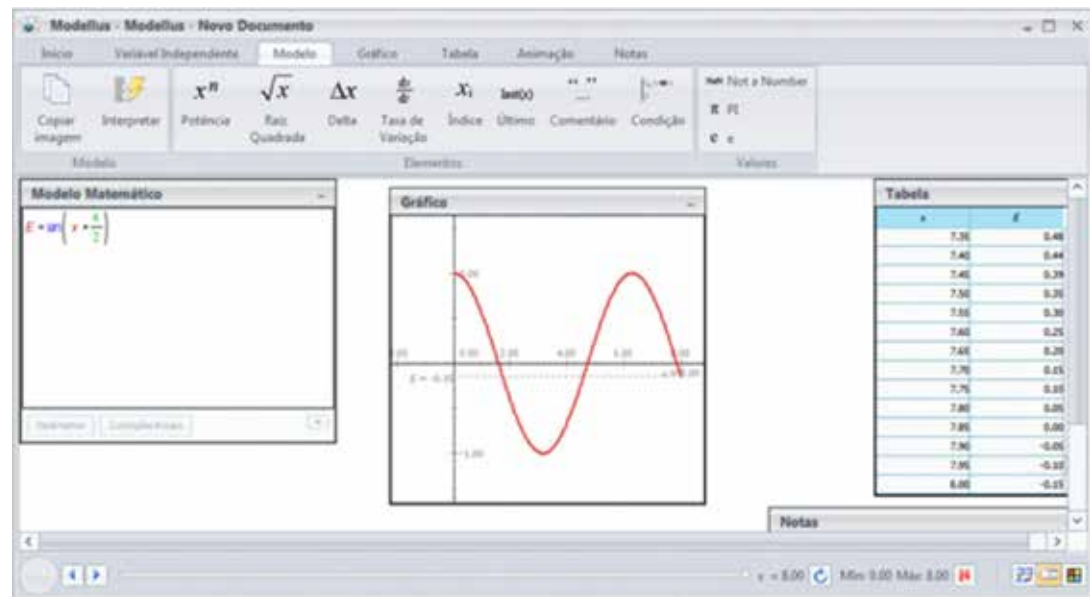
Figura 38 - Gráfico gerado pelo software Modellus para a equação $E=3\sin(2x)$.

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.



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

Alunos (as) e números

1) Vimos que devido à sua periodicidade, as ondas eletromagnéticas podem ser descritas por funções trigonométricas como $E = A \cdot \cos(k \cdot x - \omega \cdot t + \varphi)$ 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:

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

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 **□**.

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 π 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 λ , e q para φ .

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** 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 destaque 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.

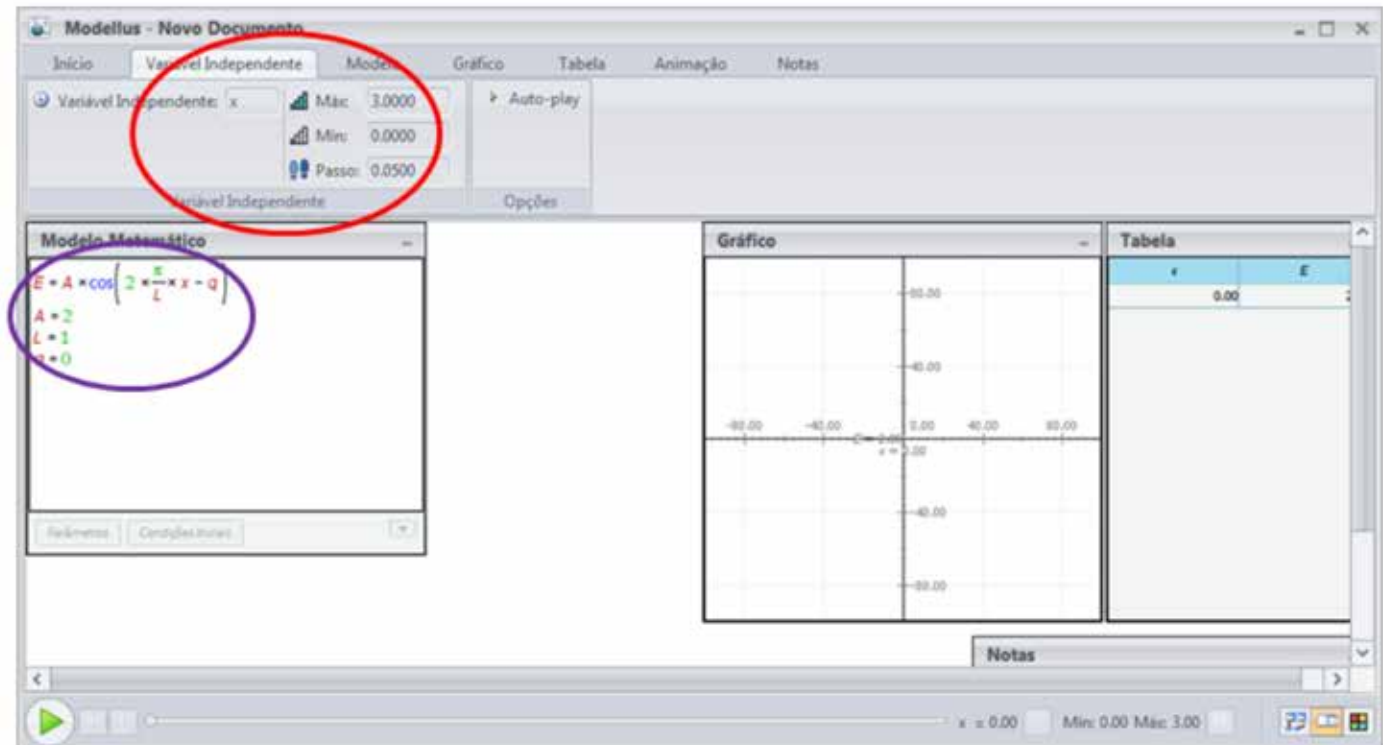


Figura 38 – Ajuste de configurações para criação do gráfico.

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

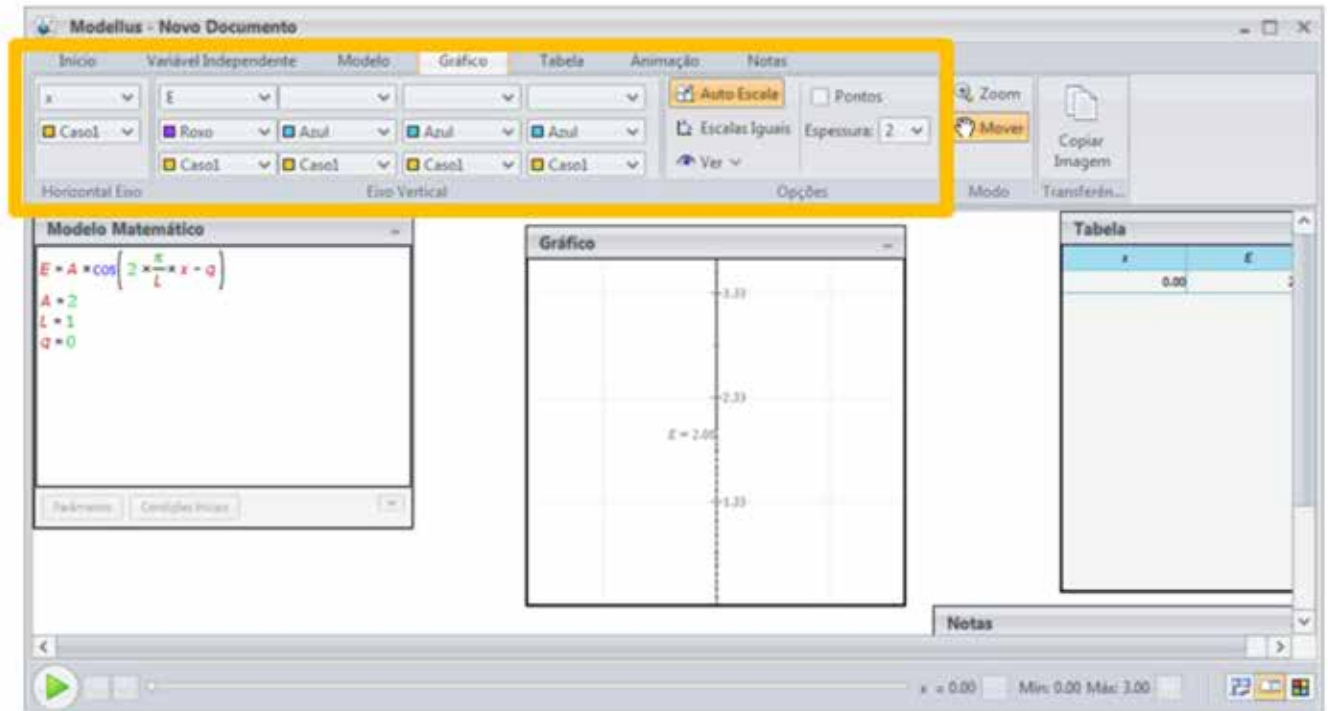
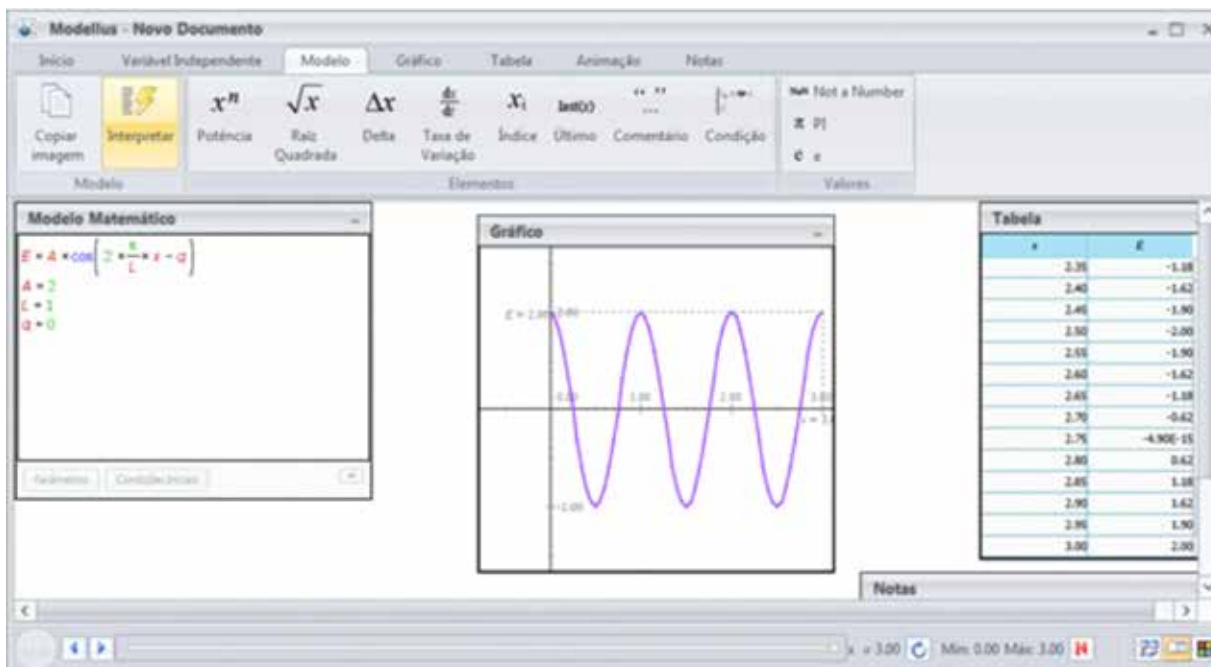


Figura 42 - O botão ‘Interpretar’ no canto superior esquerdo e o gráfico formado.

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.

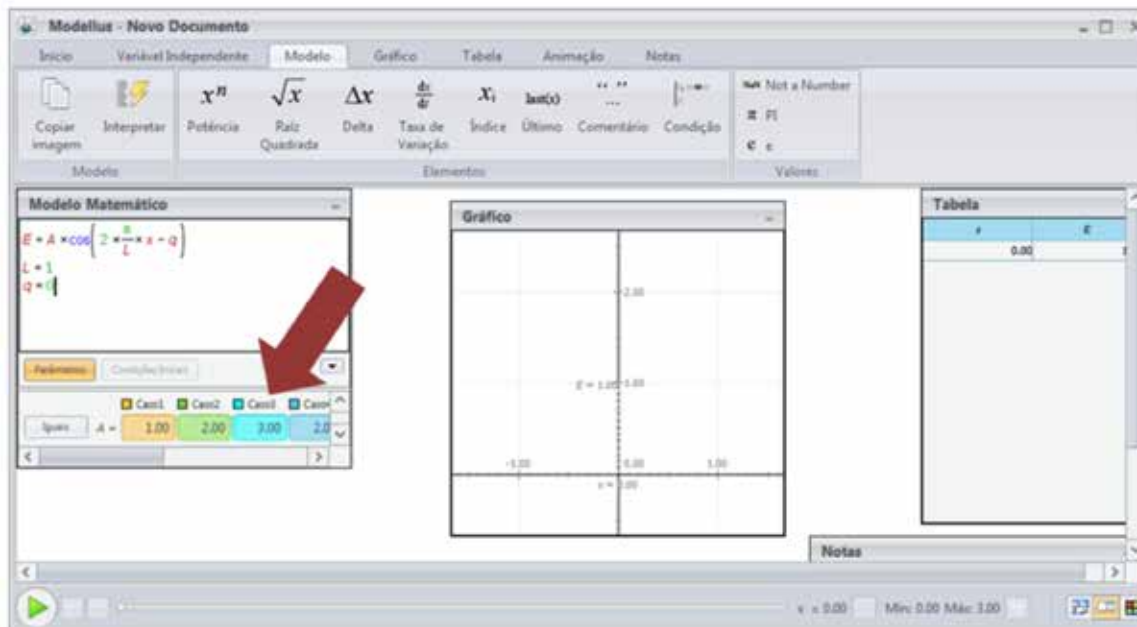
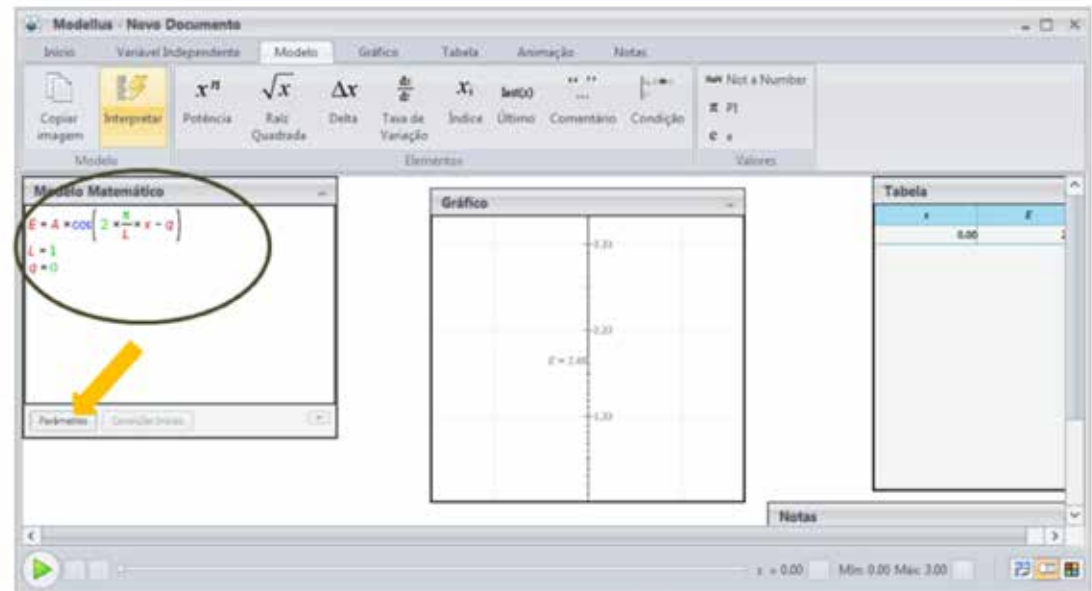
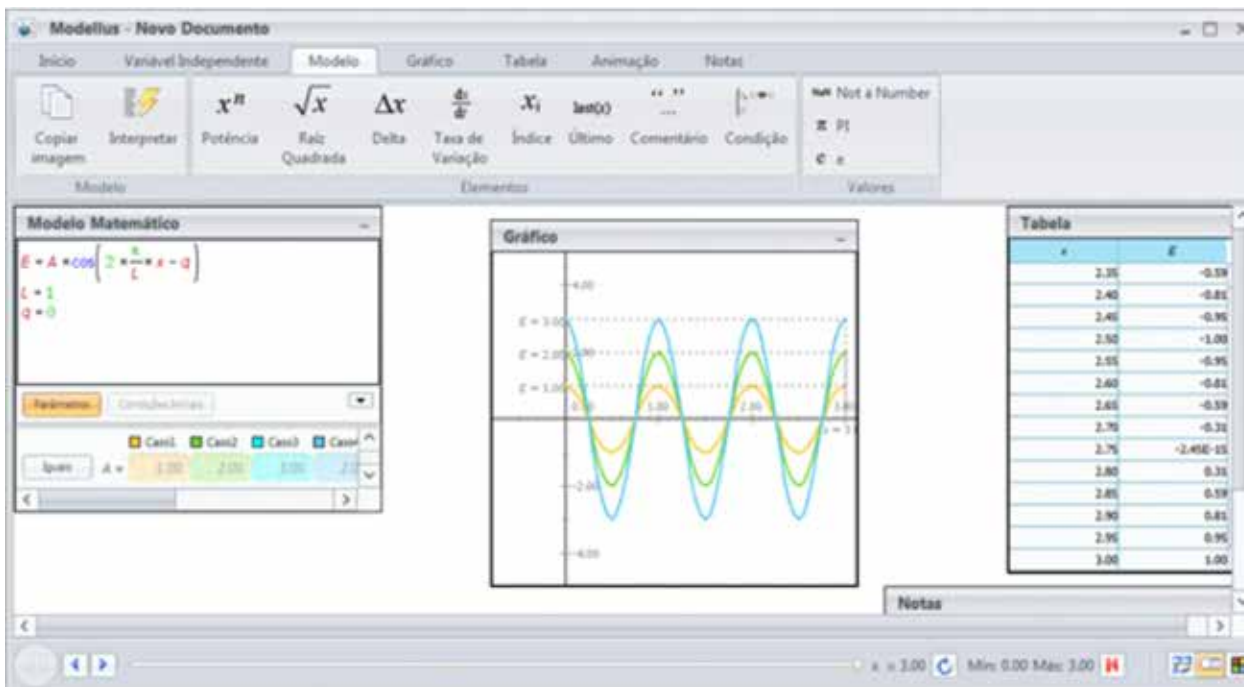
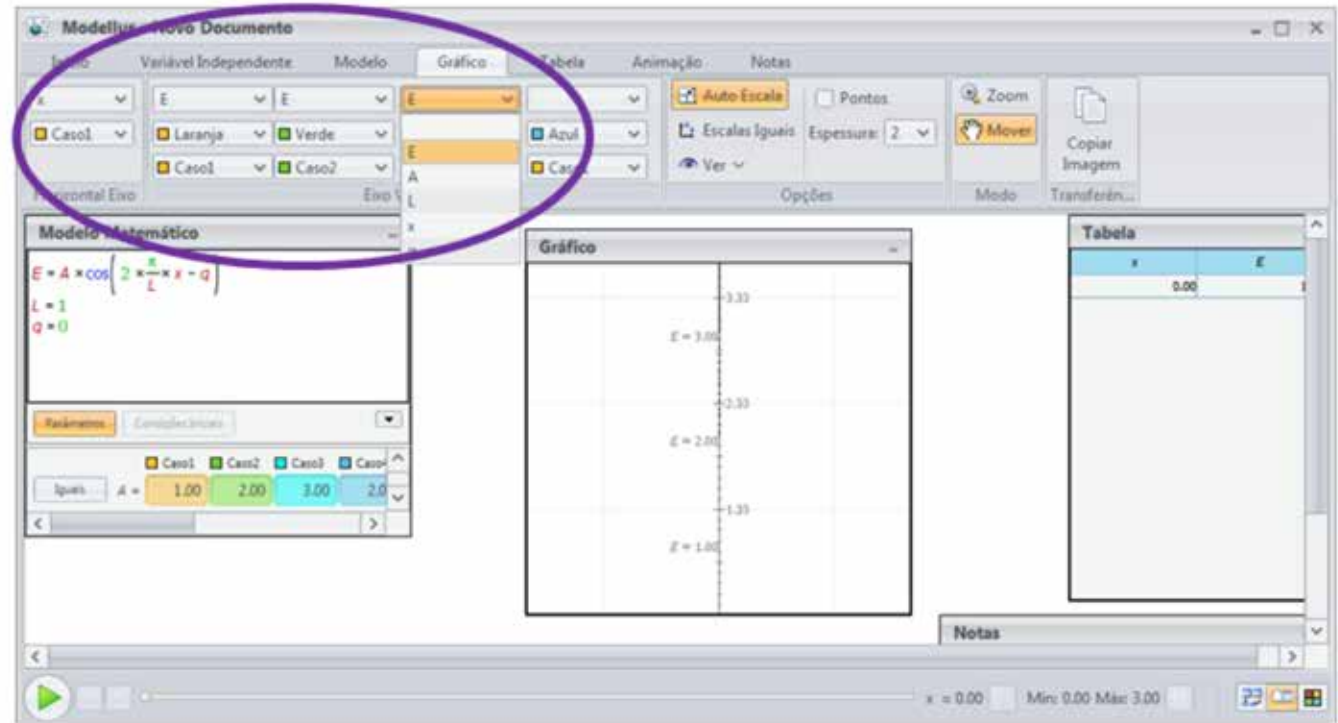


Figura 44 - Inserção de valores para na opção parâmetros.

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.

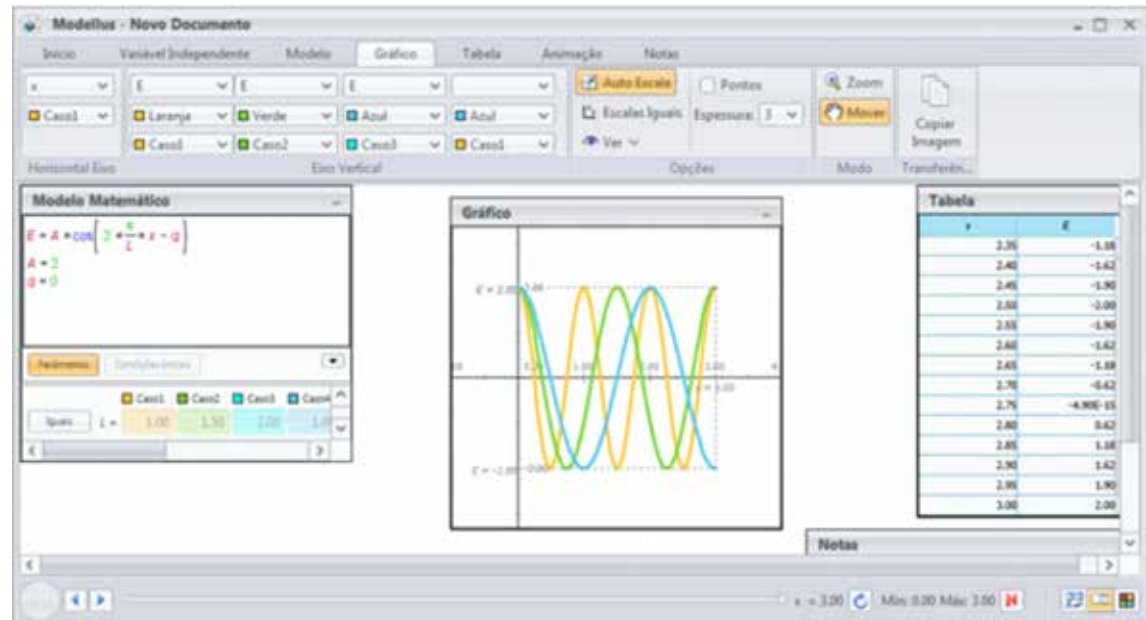
Apague o gráfico novamente. Reescreva a linha A=2 na

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.

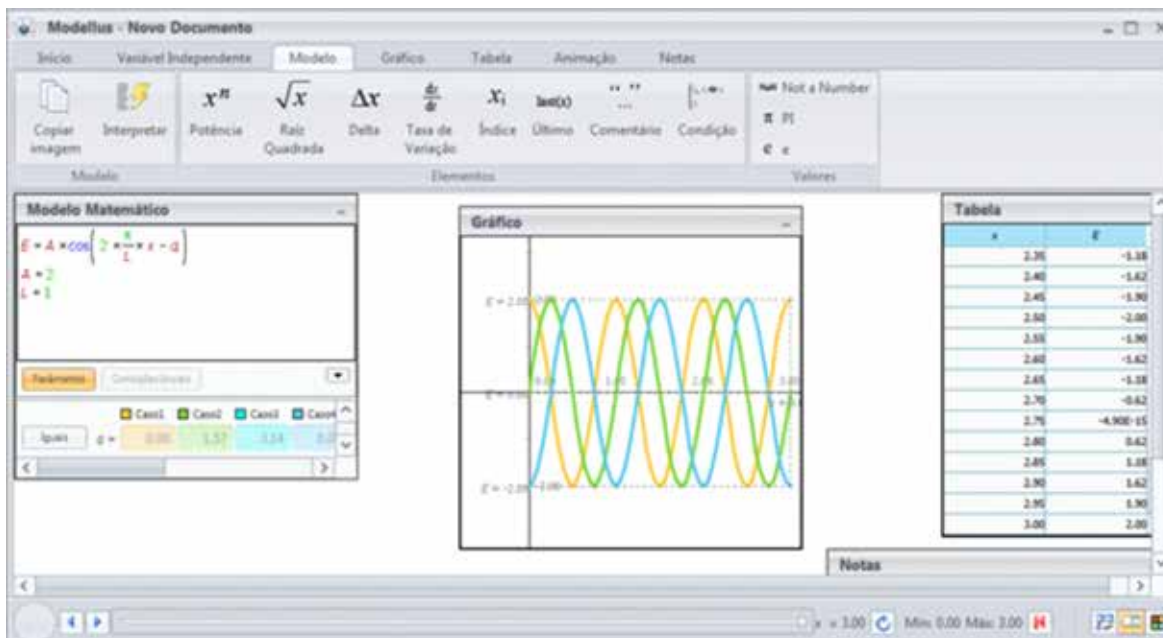
Figura 47 - Gráficos gerados com comprimentos de onda diferentes.

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



na 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.

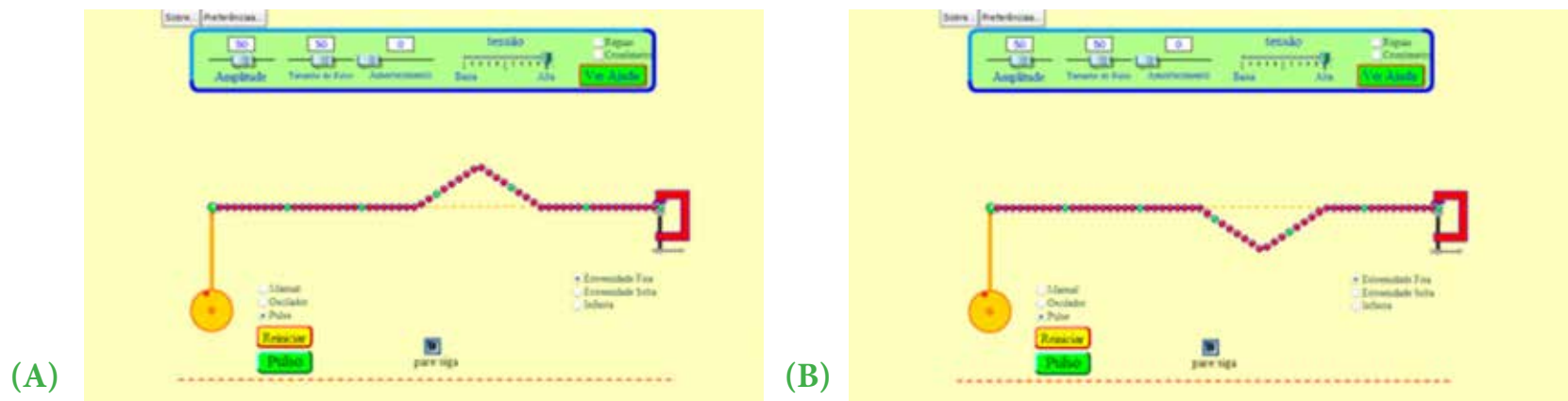
Sugerimos a exibição de um vídeo do experimento de interferência numa cuba de ondas (disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=ORgFE-QQM2w>) para iniciar a discussão sobre interferência. É interessante que a aula seja conduzida incentivando a participação dos alunos.

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 extraídas 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 pulse 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.

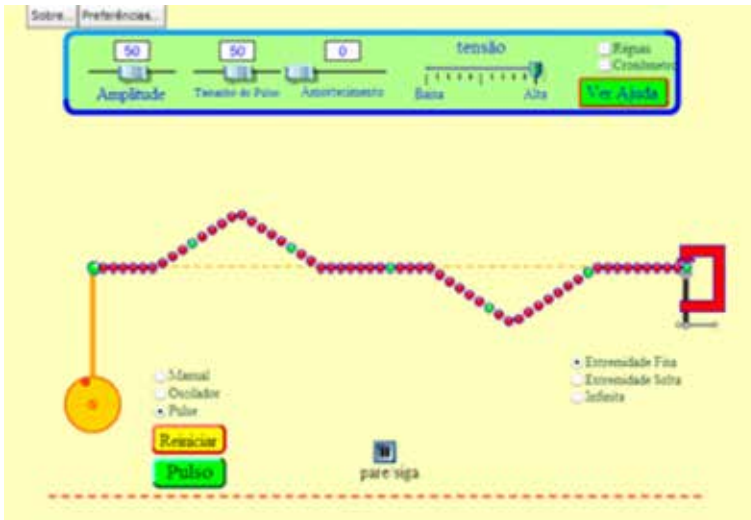


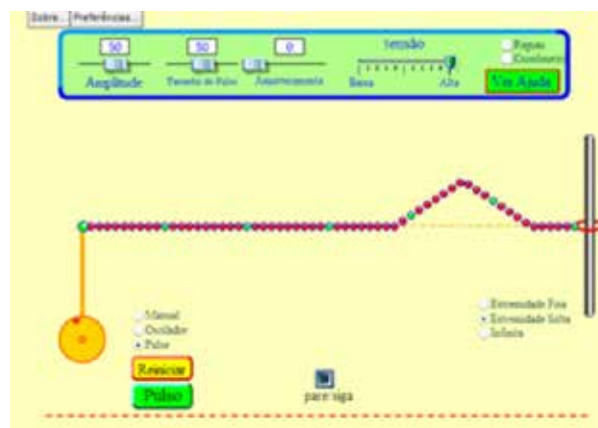
Figura 51 - Pulso refletido e outro pulso gerado que resultarão em interferência destrutiva.

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)



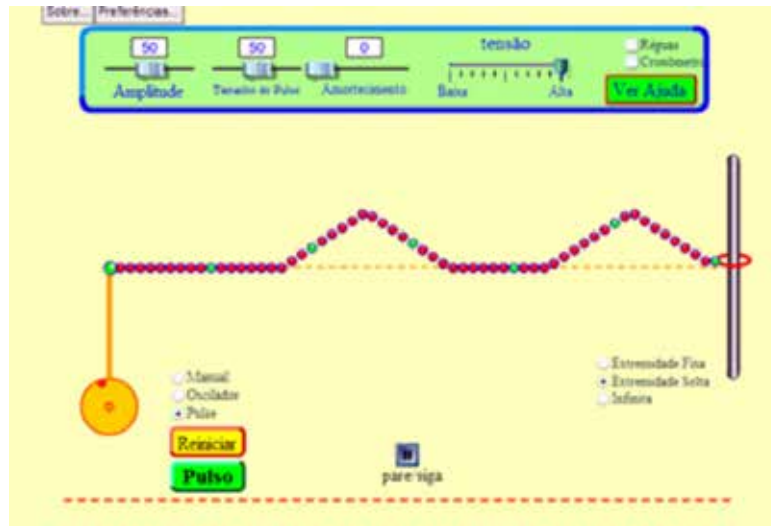
(B)



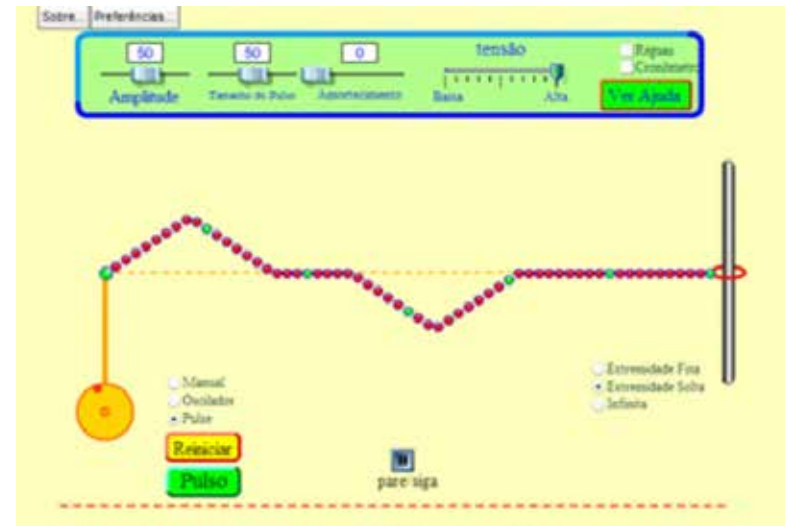
(C)

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)

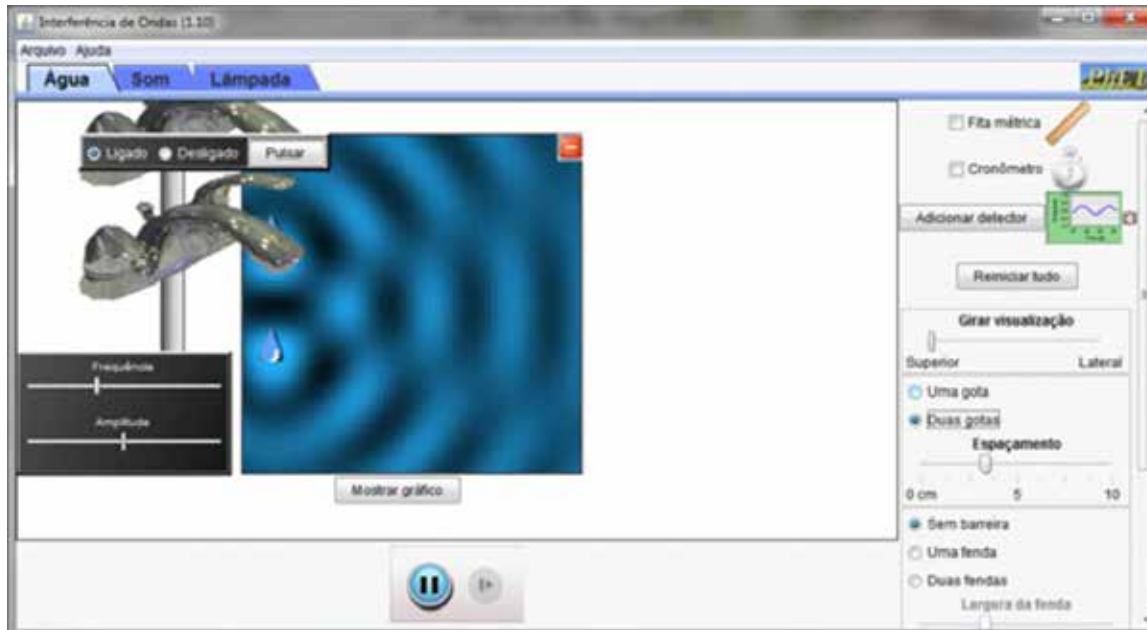


(B)

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.



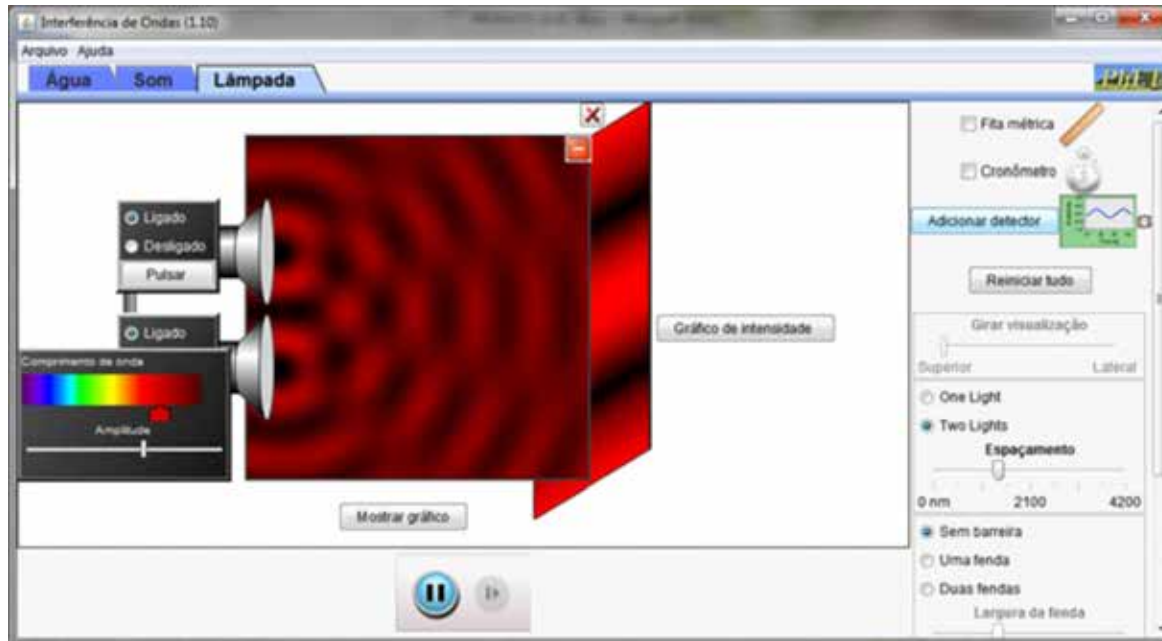


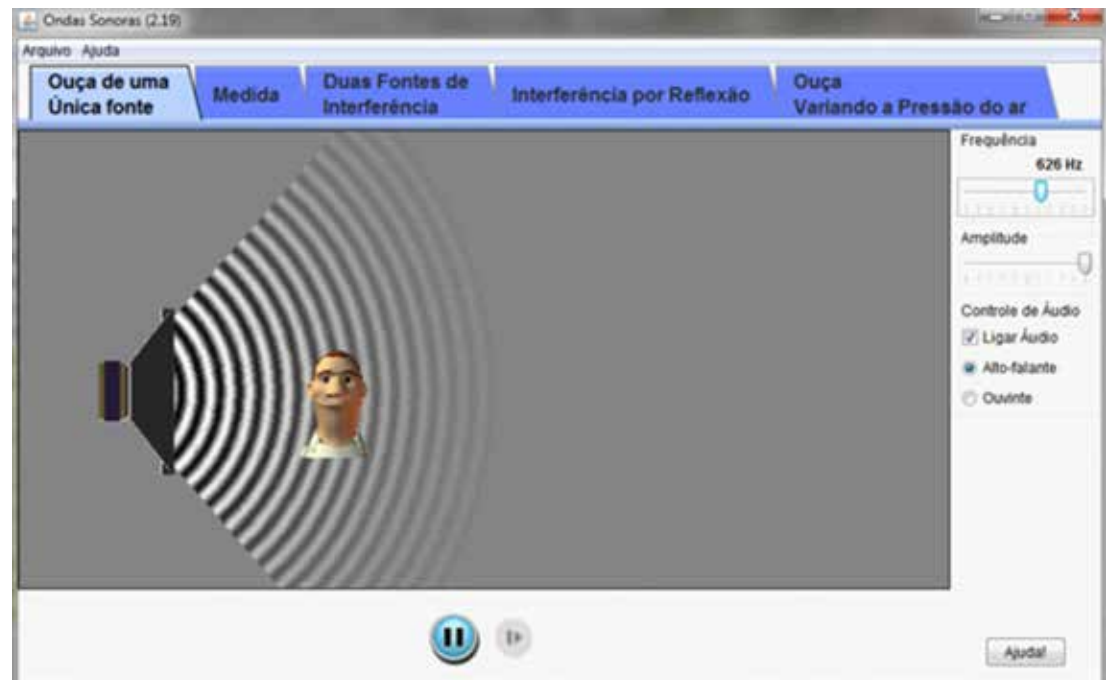
Figura 55 - Interferência entre duas fontes de luz vermelha.

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 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.

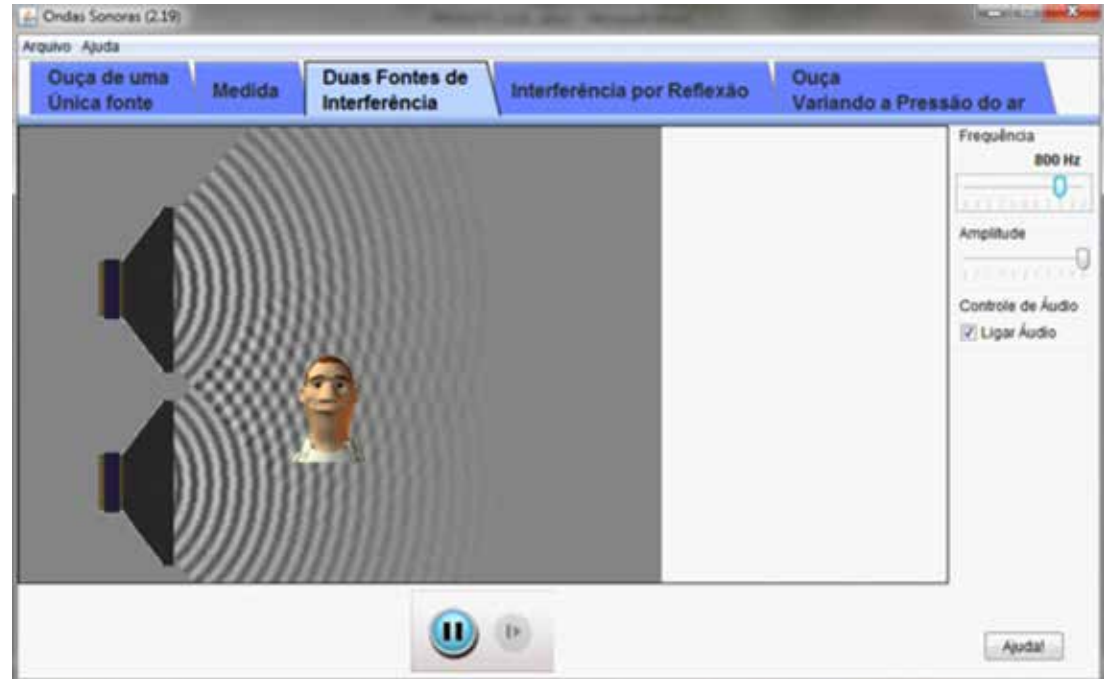
Quando iniciada, a simulação som se apresenta como na Figura 56. Note que é possível alterar a frequência e a amplitude da onda emitida, além de escolher ativar a opção ligar áudio. A Figura 57 mostra a aba



‘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.

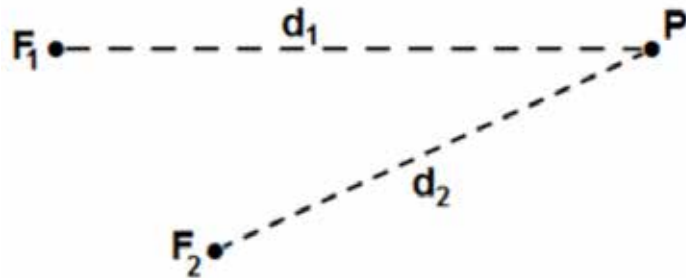


Figura 58 - Duas fontes de onda a distâncias distintas de um ponto P.

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.

$$d = n \frac{\lambda}{2}$$

Finalmente, apresente a expressão apresentada na Equação (9), na qual d é a diferença de caminho, λ 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 , λ e ϕ . 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.

2ª Atividade com software MODELLUS
Interferência de Ondas Eletromagnéticas

Disciplina: **FISICA** Professora: **ΣAMIA** Série/Turma: **2º** 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 π 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 λ , e o para ω .

1) Utilizamos o software Modellus para criar gráficos para a equação

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

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.
 Complete a tabela a seguir indicando qual é o elemento correspondente a cada parâmetro e como pode ser percebido no gráfico.

	Grandeza	Observação no gráfico
A		
L		
q		

2) A interferência de ondas é a sua superposição no espaço e a onda resultante da interferência é dada pela soma das ondas originais.
 Considerando duas ondas distintas, com campos elétricos E1 e E2, a onda resultante terá campo elétrico E dado por $E = E1 + E2$.
 Para criar as ondas no software, insira as equações abaixo na janela 'Modelo matemático':

$$E1 = 2 \cdot \cos\left(2 \cdot \frac{\pi}{1} \cdot x - 0\right)$$

$$E2 = 2 \cdot \cos\left(2 \cdot \frac{\pi}{1} \cdot x - 0\right)$$

$$E = E1 + E2$$

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'. Clique em 'interpretar' na aba modelo. Dê play (seta verde embaixo à esquerda) e observe os gráficos formados.

a) Quantos gráficos podem ser vistos? _____
 Quais?

b) Se na aba 'gráfico' você definiu que seriam três, por que não vemos o terceiro?

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?

3) 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 π . 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 _____.

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? _____.

4) 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.

5) 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.

6) 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 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:

$$E1 = 2 \cos\left(2 \frac{\pi}{1} x - 0\right)$$

$$E2 = 2 \cos\left(2 \frac{\pi}{1} x - 0\right)$$

$$E = E1 + E2$$

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.

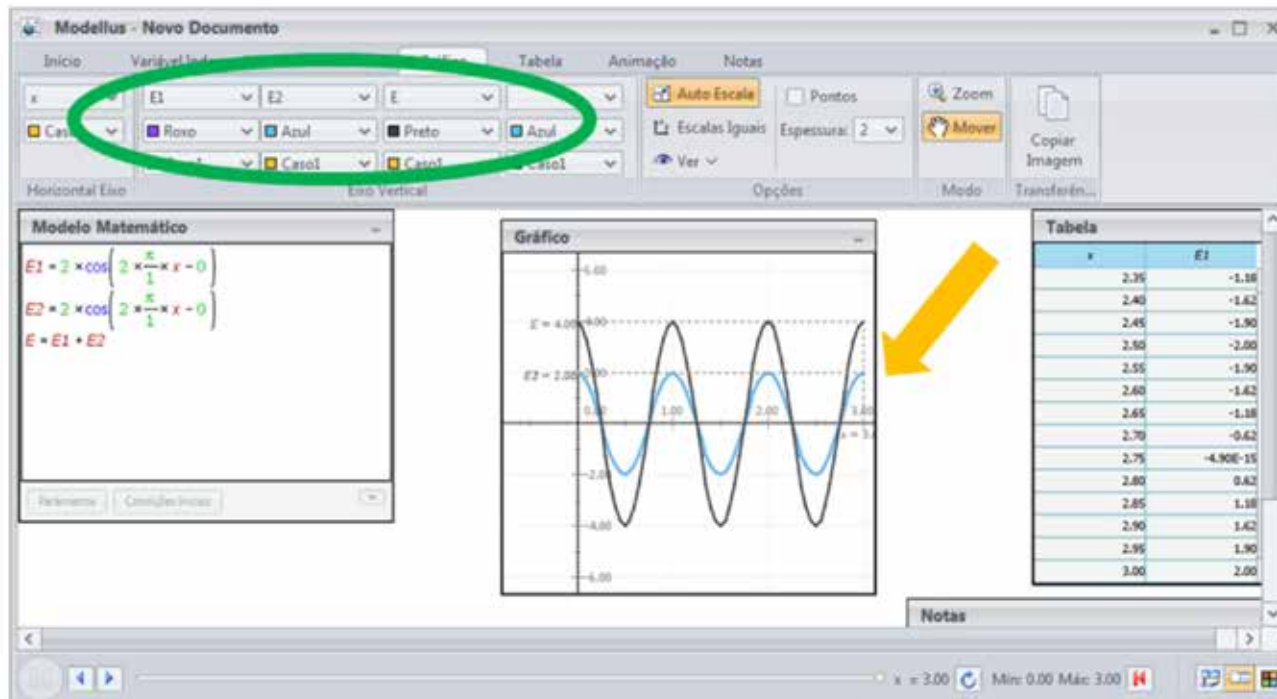


Figura 60 - Gráficos formados quando são somadas duas ondas com equações idênticas.

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 tenha 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,

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.

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

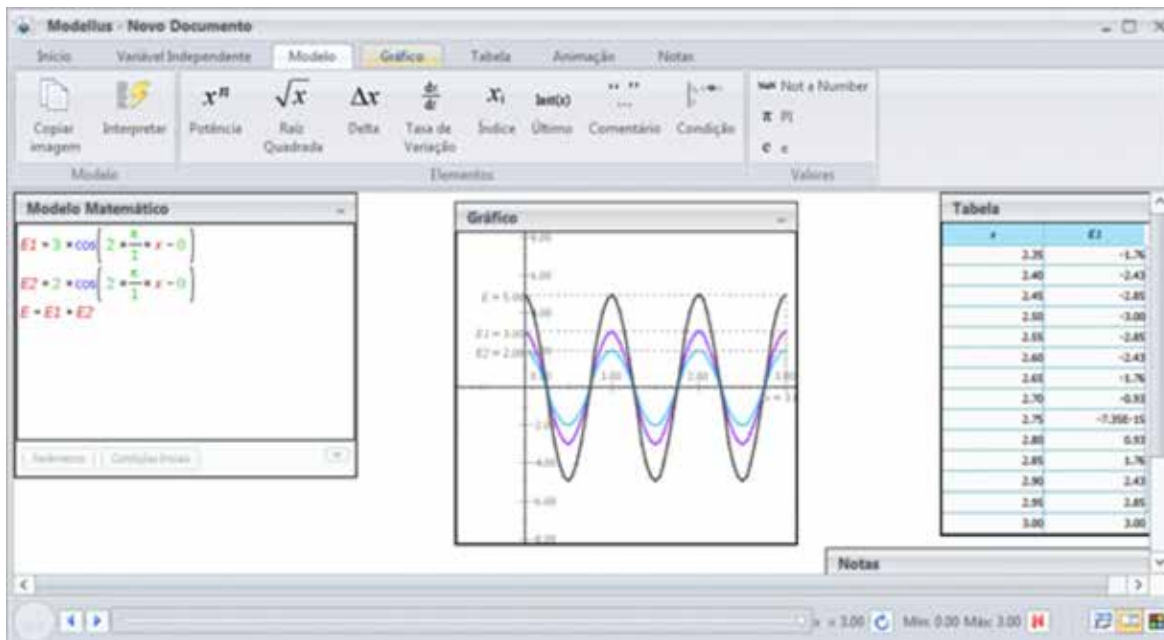
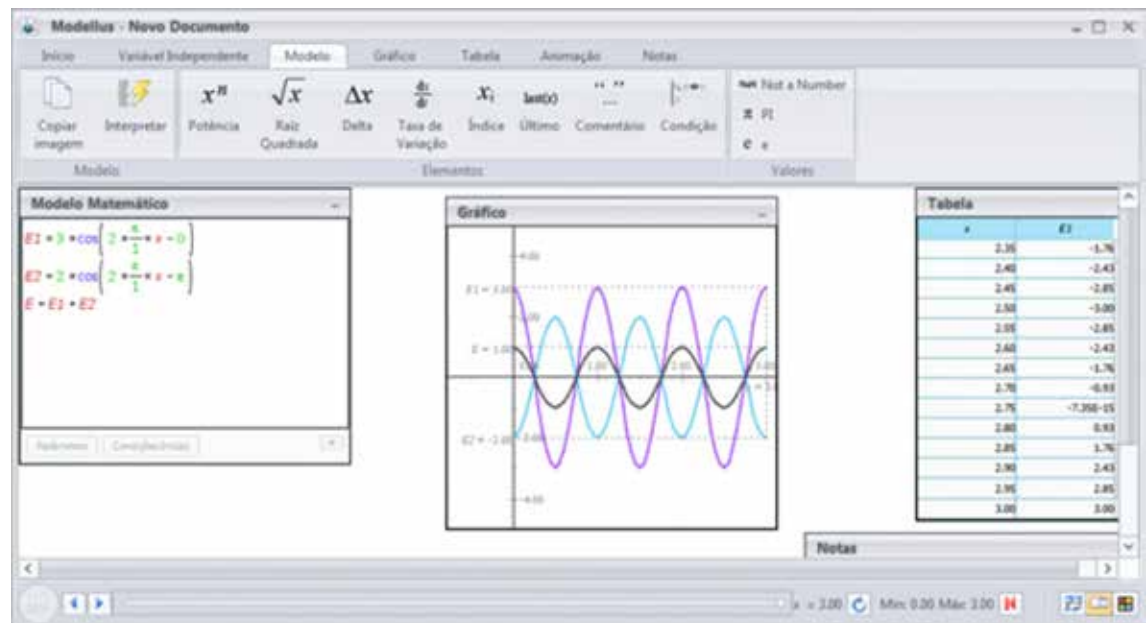


Figura 61 - Alterada a amplitude de uma das equações, visualiza-se os três gráficos.

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.



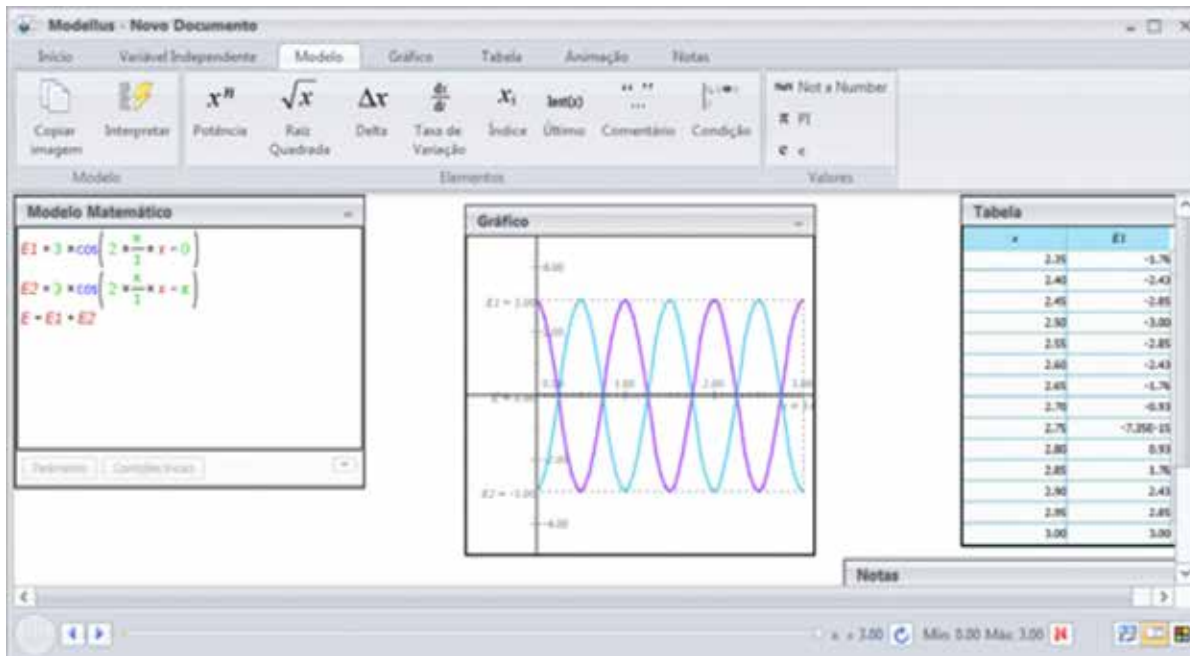


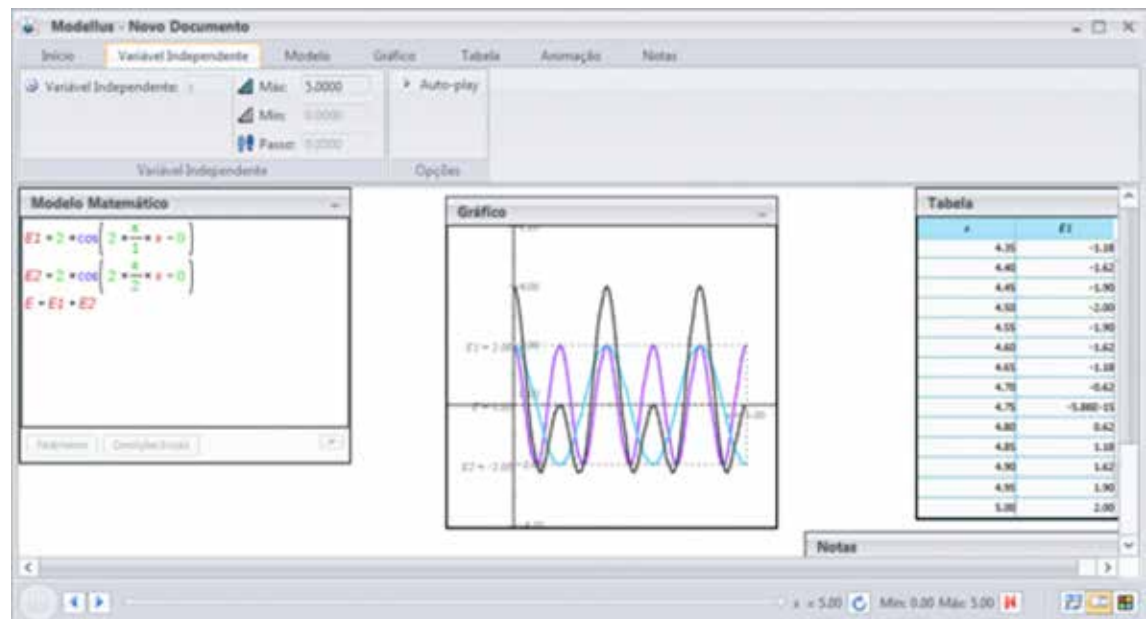
Figura 63 - Interferência totalmente destrutiva.

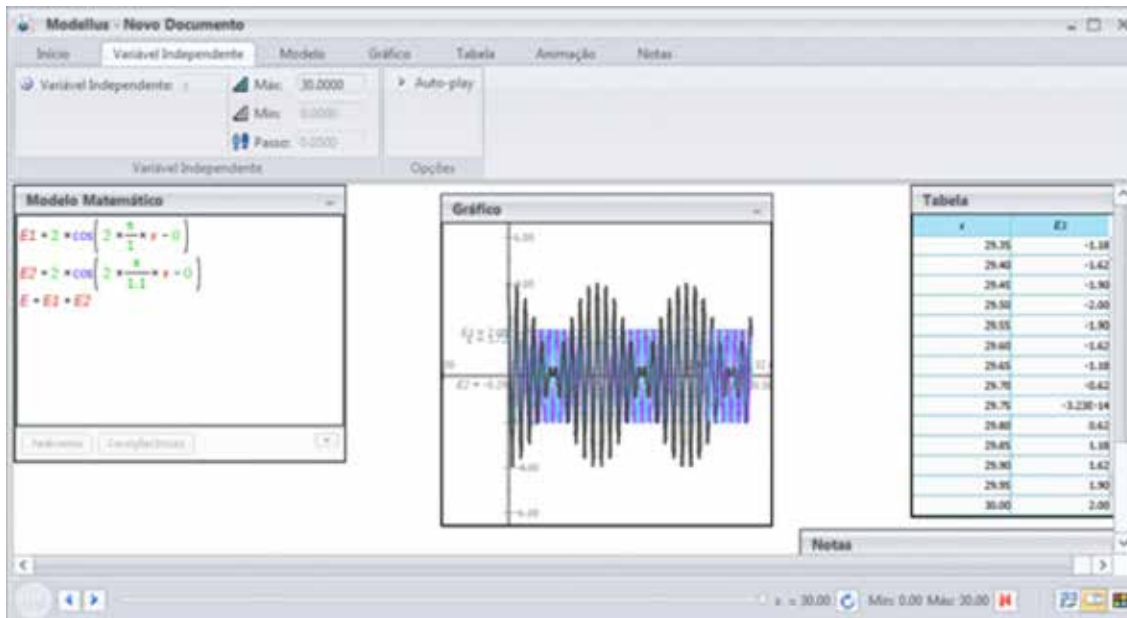
Para ilustrar que não são apenas ondas de mesmo comprimento e frequência que sofrem interferência, o roteiro sugere que os gráficos sejam refeitos, atribuindo-se o valor 2 para a amplitude e zero para a fase em ambas as equações, mas deixando-as com comprimentos de onda distintos, sendo 1 o valor de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

o valor 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>

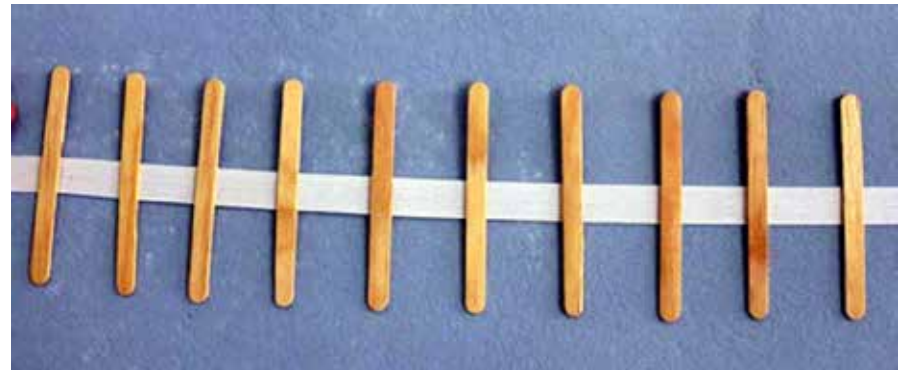
A outra atividade é chamada de máquina de ondas e, para montá-la, coloque o elástico esticado sobre uma superfície lisa e cole os palitos de picolé perpendicularmente ao elástico, separados por cerca de 3 cm. É importante que os palitos fiquem bem alinhados no elástico e que a distância se mantenha constante.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



Difração

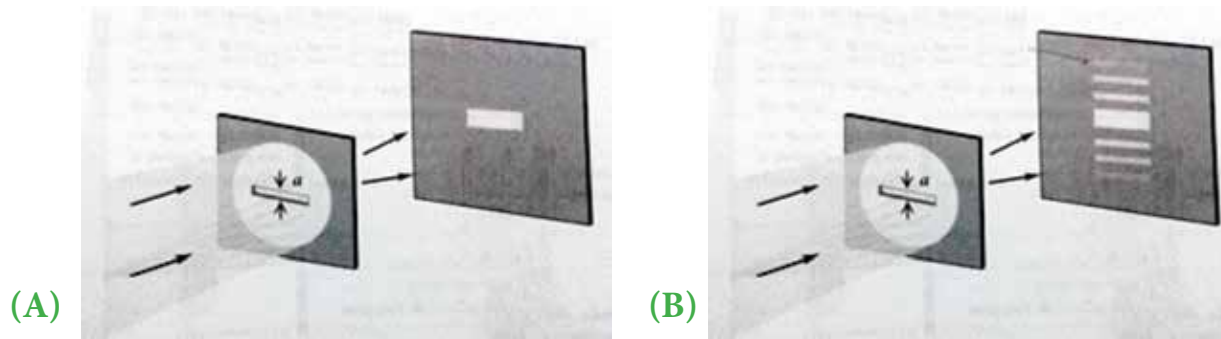
Para iniciar o conteúdo de difração, sugerimos uso de imagens, como nos slides mostrados na Figura 71.

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.

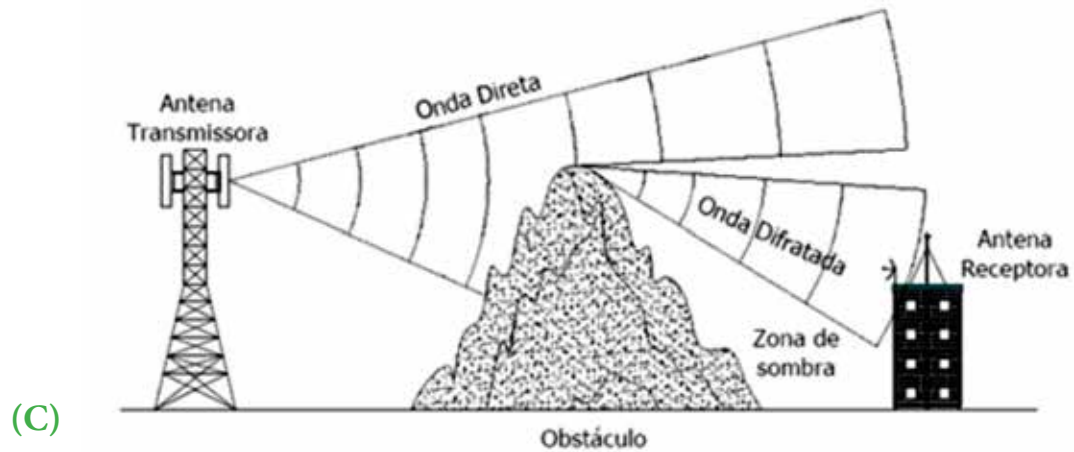
Figura 72 - (A) Sombra geométrica formada pelo anteparo com uma fenda e (B) franjas de difração quando a fenda apresenta espessura da ordem de grandeza do comprimento de onda da luz



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.

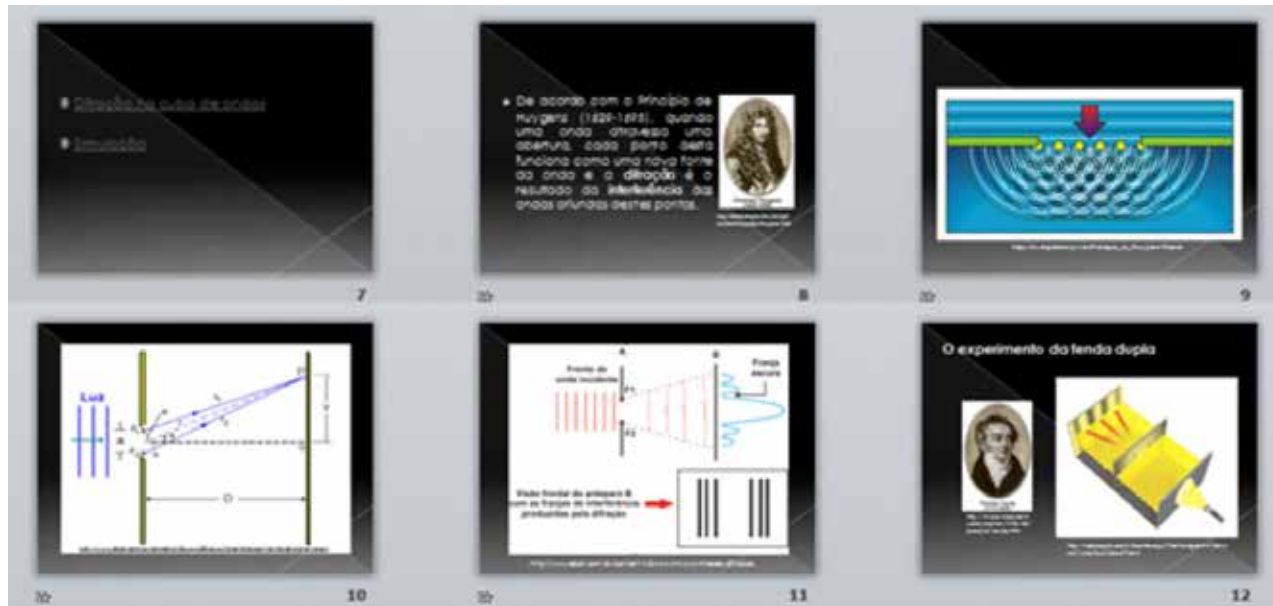


Figura 74 - Continuação dos slides para a aula de difração.

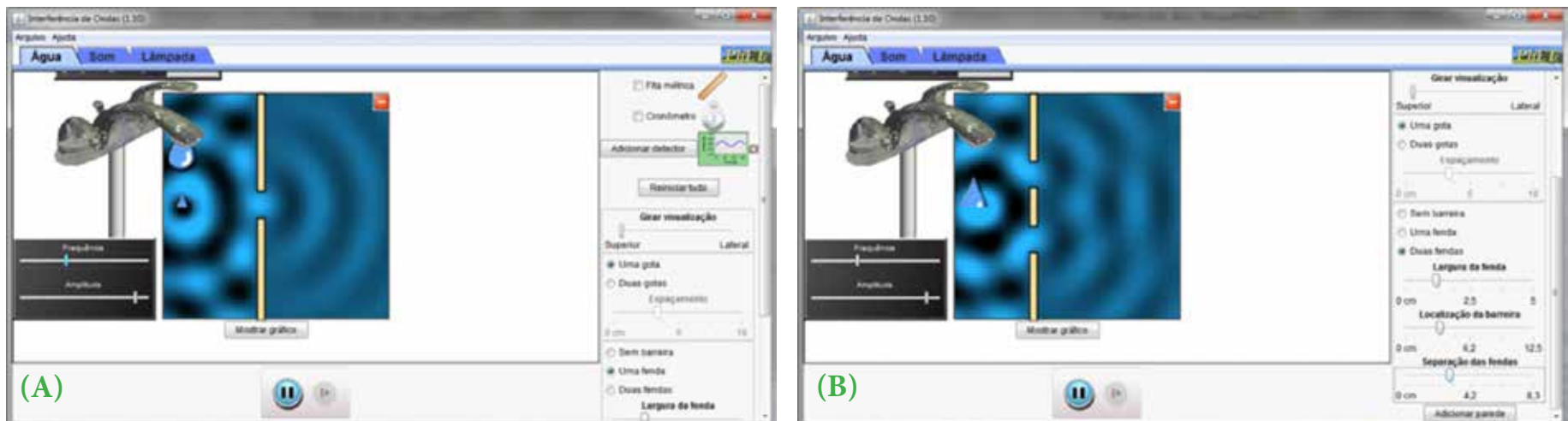
O primeiro link do slide de número 7, leva à exibição do vídeo Difração na cuba de ondas, disponível em <https://www.youtube.com/watch?v=en-Q6EeP9frk> e representado pela Figura 75.



Figura 75 - Imagem extraída do vídeo
Difração na cuba de ondas.

O segundo link leva à simulação de 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.

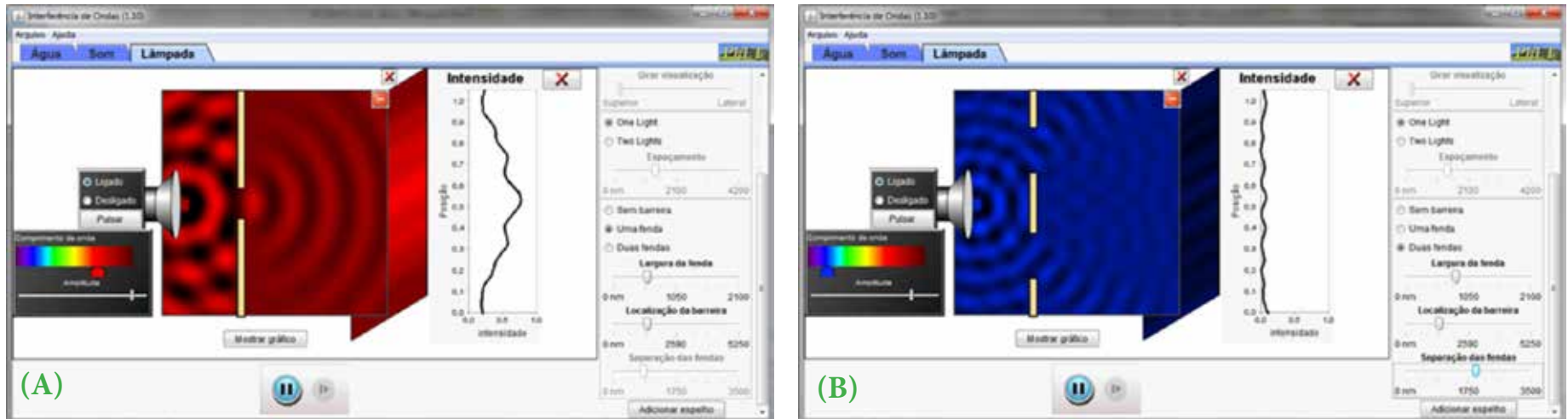
Figura 76 - Imagens da simulação de difração de ondas na água com (A) uma fenda e com (B) duas fendas.



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 $3 \cdot 10^8$ 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.

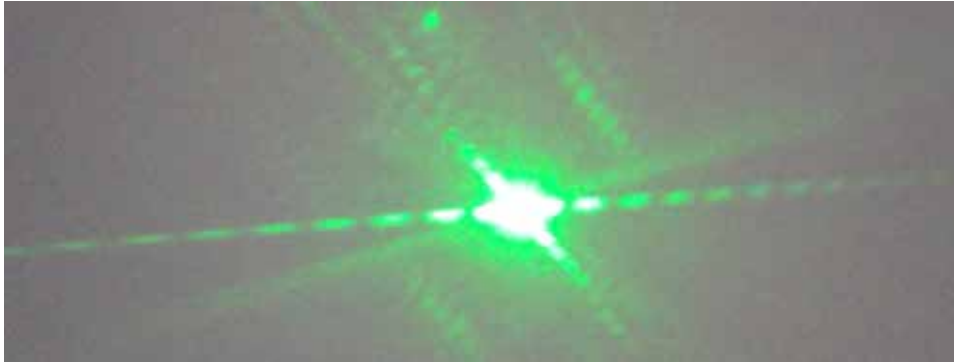
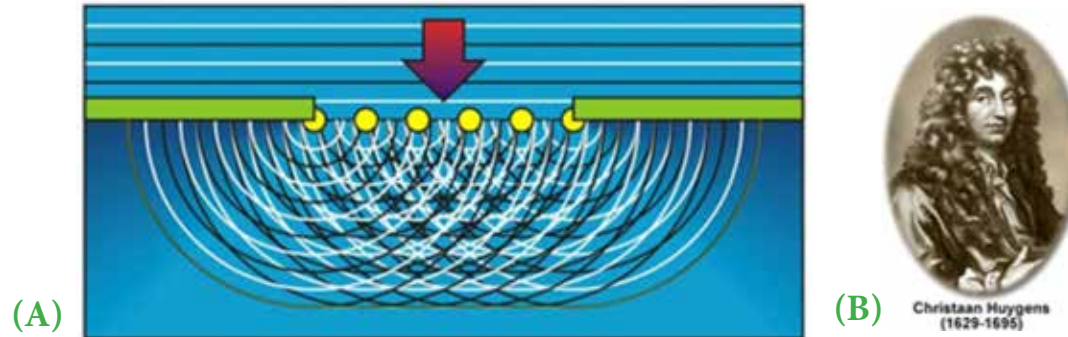


Figura 78 - Figura de difração quando o laser é incidido em um fio de cabelo.

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/Princípio_de_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.

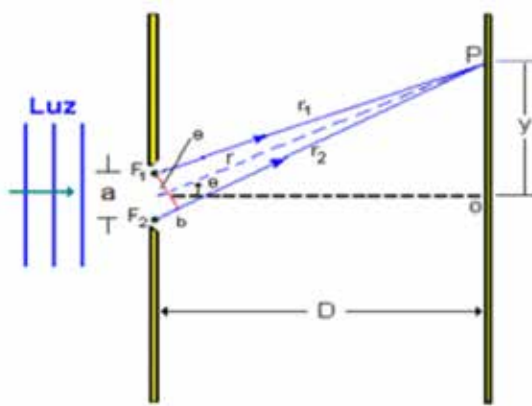
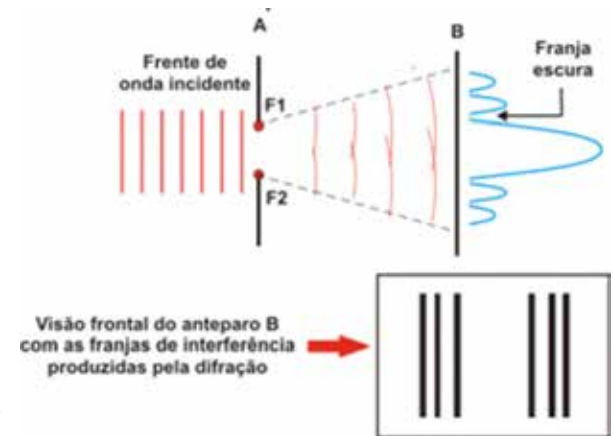


Figura 80 - Análise da condição para que no ponto P haja uma franja clara ou escura.

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.



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.

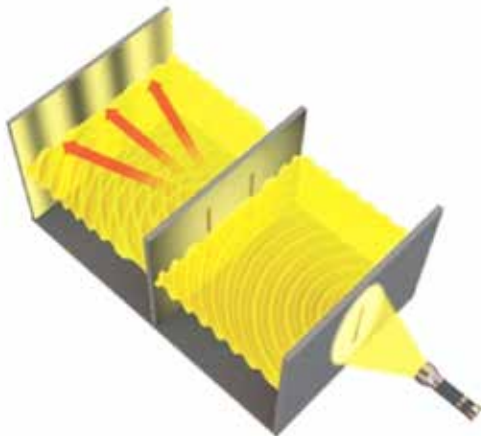


Figura 82 - Representação do experimento de Young.

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.

$$I = I_m \cdot \left(\frac{\text{sen}\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right)}{x} \right)^2$$

Nessa equação, I_m representa a intensidade luminosa máxima projetada no anteparo e λ 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).

$$I = 2 \cdot 10^2 \cdot \left(\frac{\text{sen}(x)}{x} \right)^2$$

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 π 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 λ , e q para ϕ .

- 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 2π , 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?

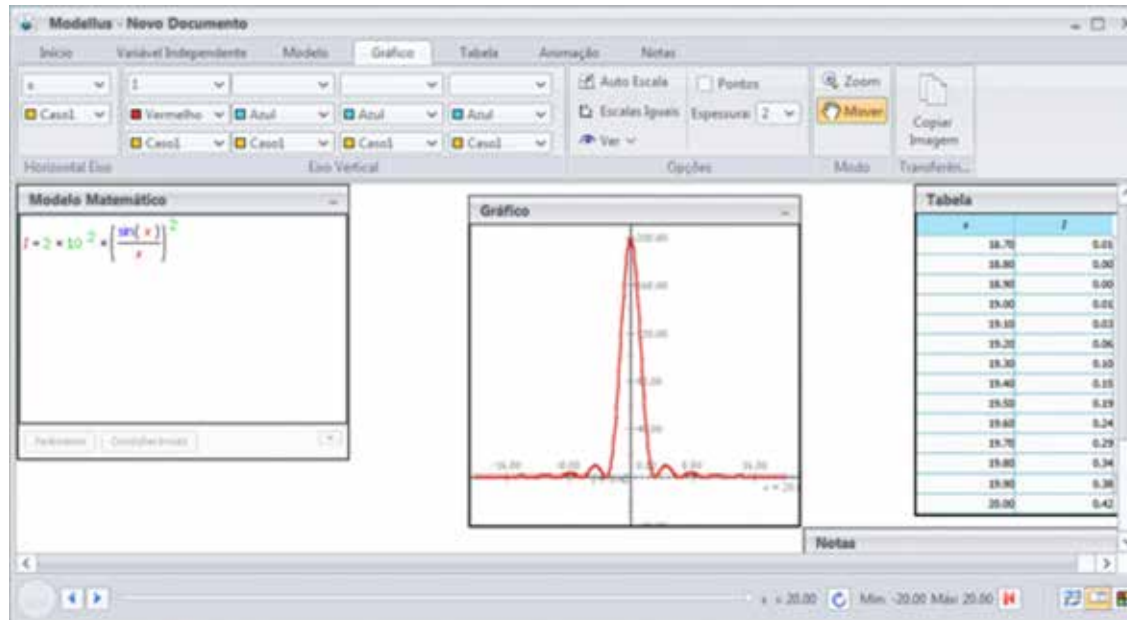
- f) Entre as regiões de máximo (picos) existem pontos de intensidade zero. Indique alguns dos zeros do gráfico. Como podemos explicar o fato de que não existe luz nesses pontos?

- 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.



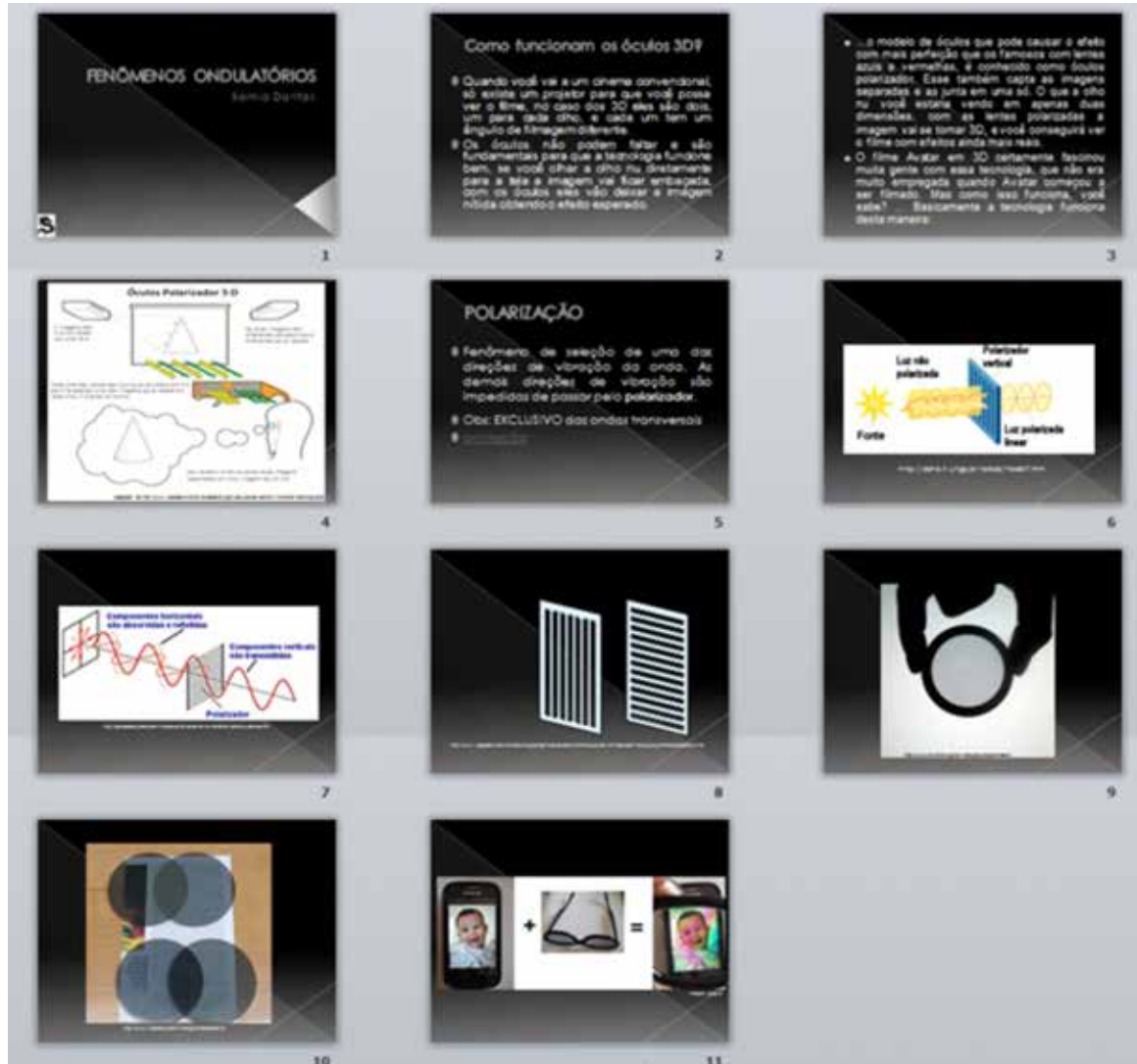
O roteiro apresenta questões para explorar o gráfico gerado. Entre as questões, estão identificar as intensidades do máximo central e dos máximos secundários, localizar pontos de mínimo além de elencar a região onde o efeito é perceptível, que parece ficar entre as posições -16 e $+16$. O roteiro também 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.

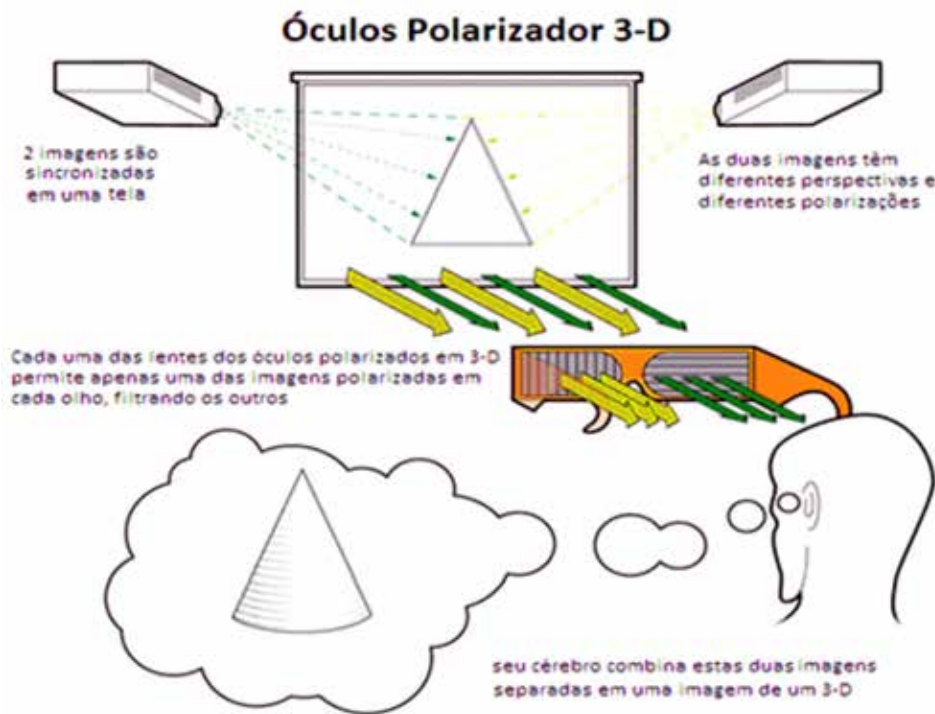


Figura 86 - Representação do funcionamento dos óculos polarizadores utilizados no cinema 3D.

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-KWZ4pgvMISVHFZZ1VzaXExQVk/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>.

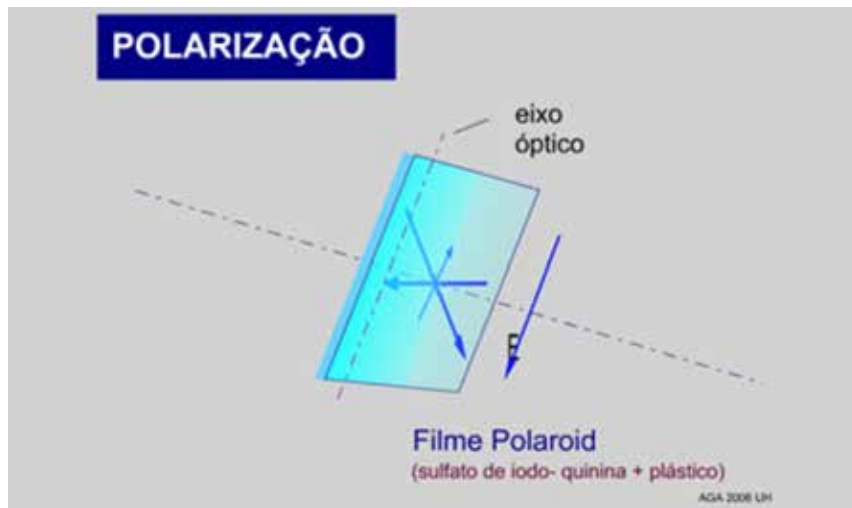
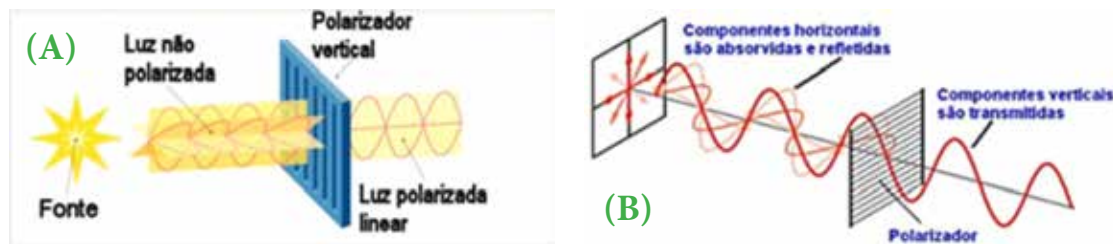


Figura 87 - animação sobre polarização.

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 e representada na Figura 91.

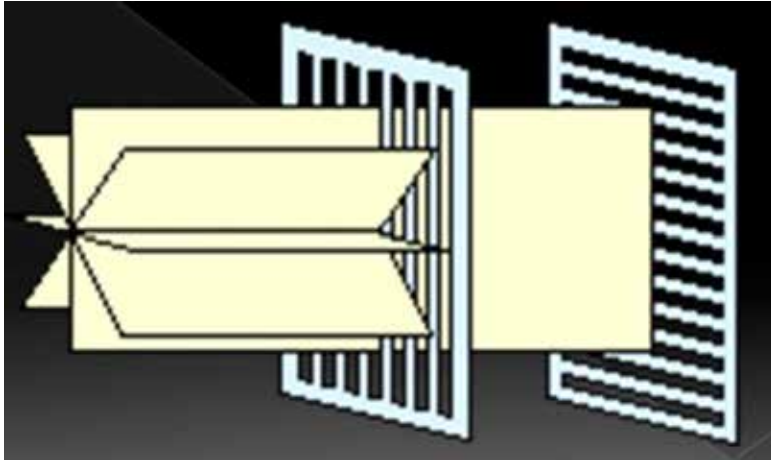
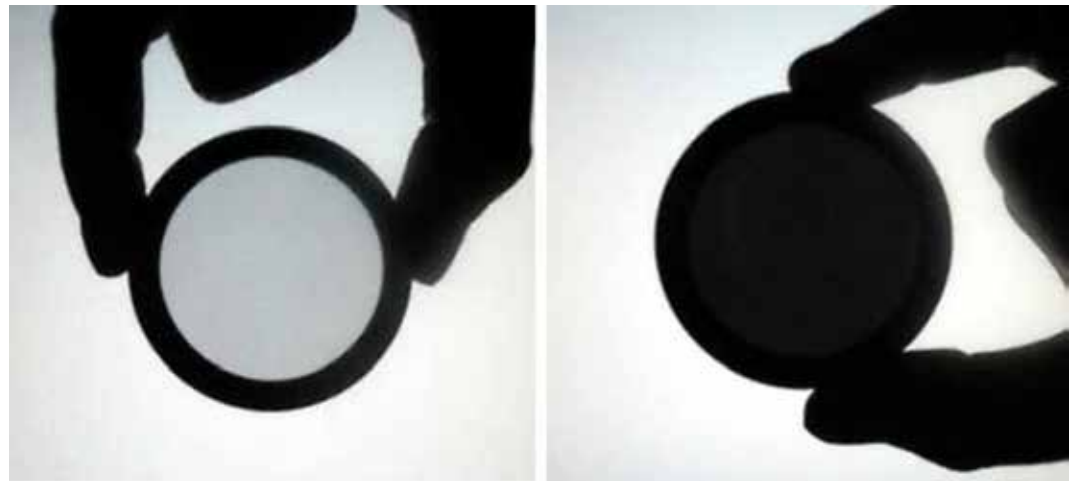


Figura 91 - Animação mostrando dois polarizadores opostos anulando um feixe de luz.

Para mostrar a anulação da luz usando apenas um polarizador sugerimos a animação disponível em http://www.dicionario.pro.br/index.php/Luz_polarizada 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.

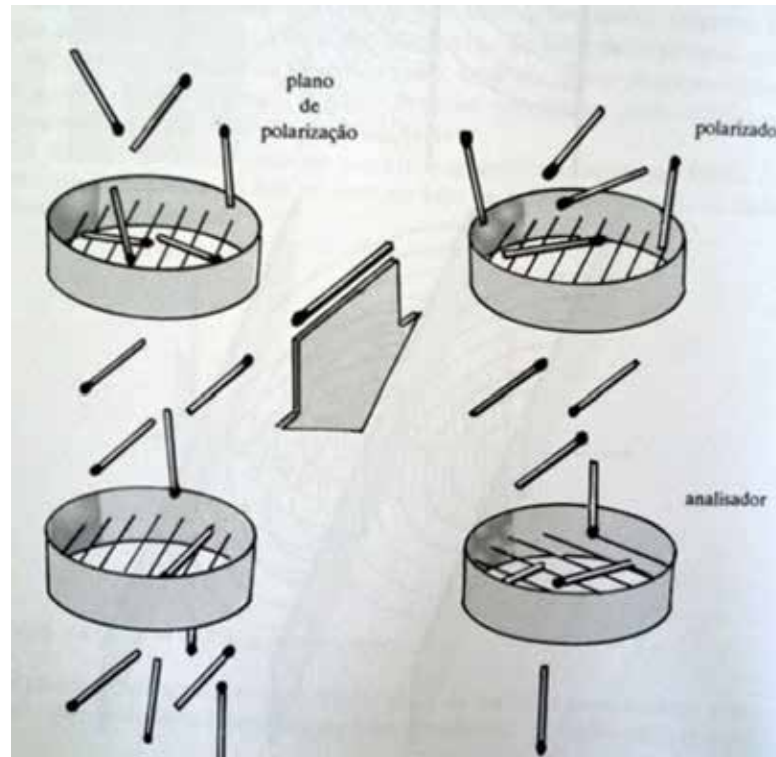


Outra forma de mostrar aos alunos essa possibilidade é posicionar e girar os óculos de cinema diante da lente do projetor multimídia. Com o computador ligado, ocorrerá efeito semelhante ao da Figura 89 e, caso não esteja sendo projetada nenhuma imagem, pode acontecer como na Figura 92.

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.

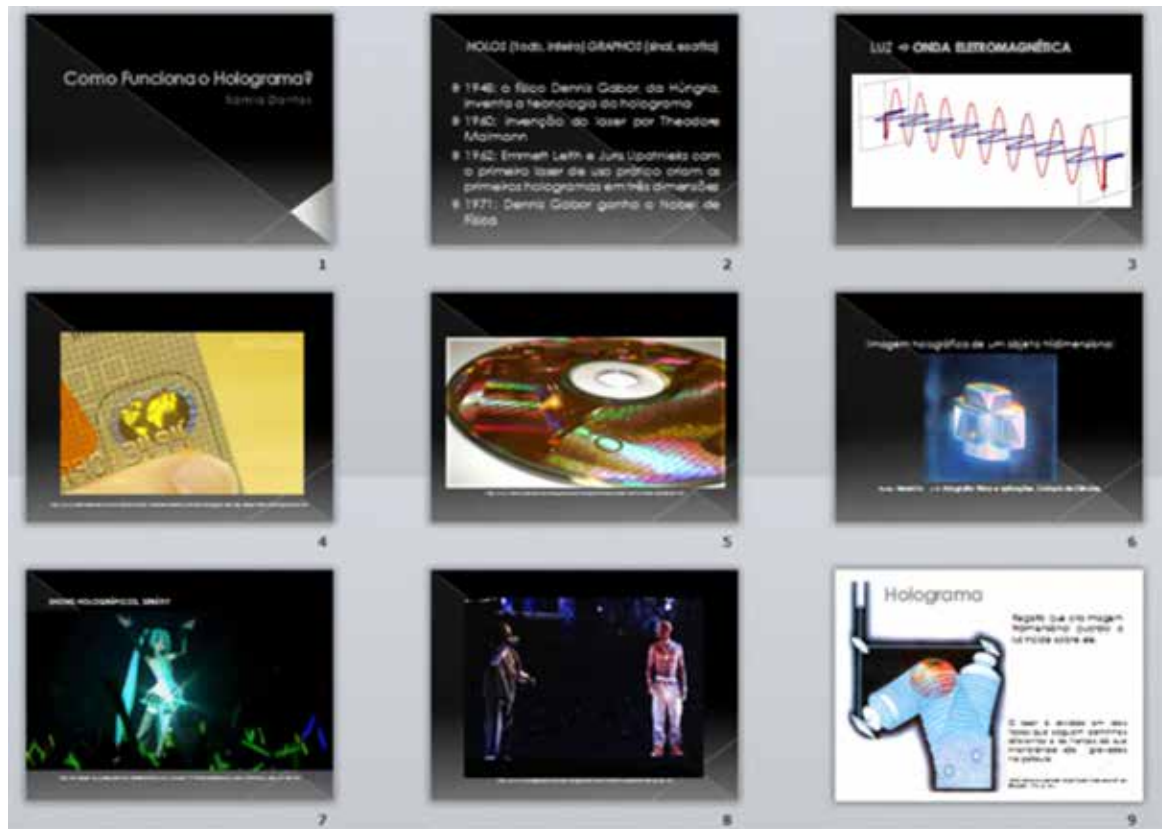


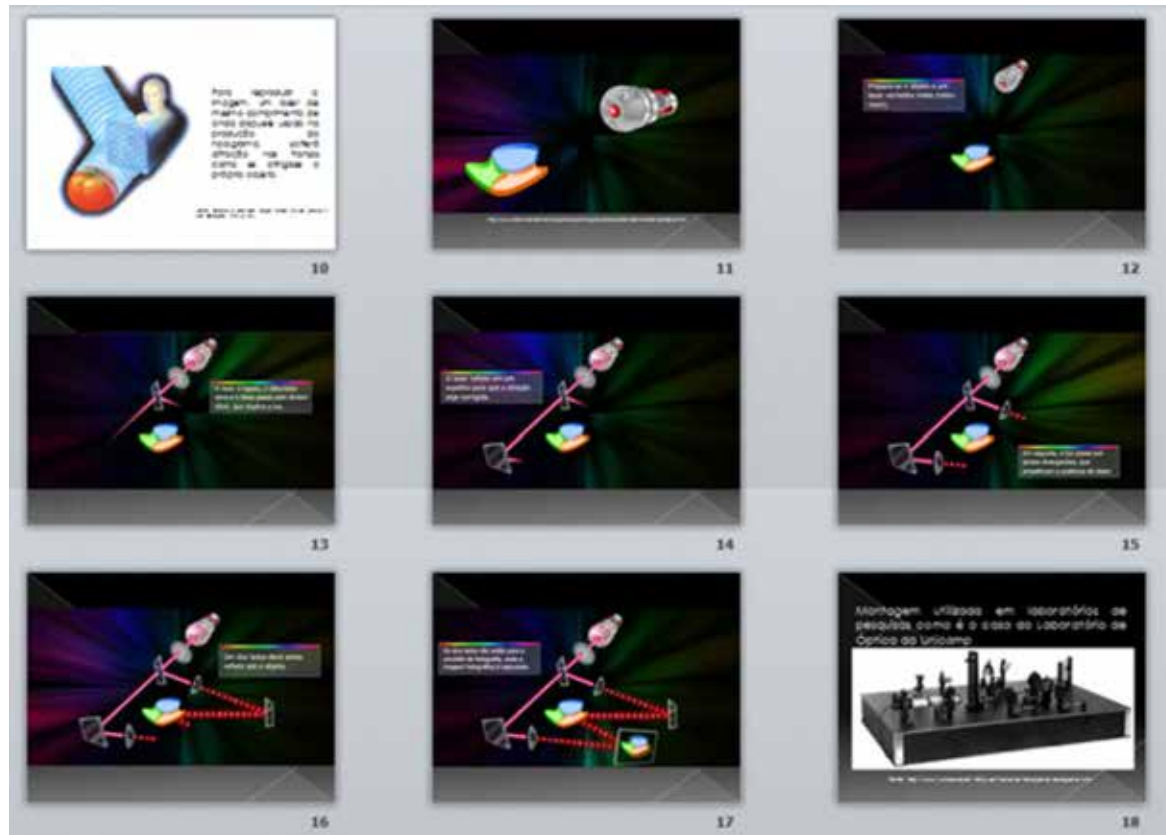
Fonte: GREF, 2002, p. 220.

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.

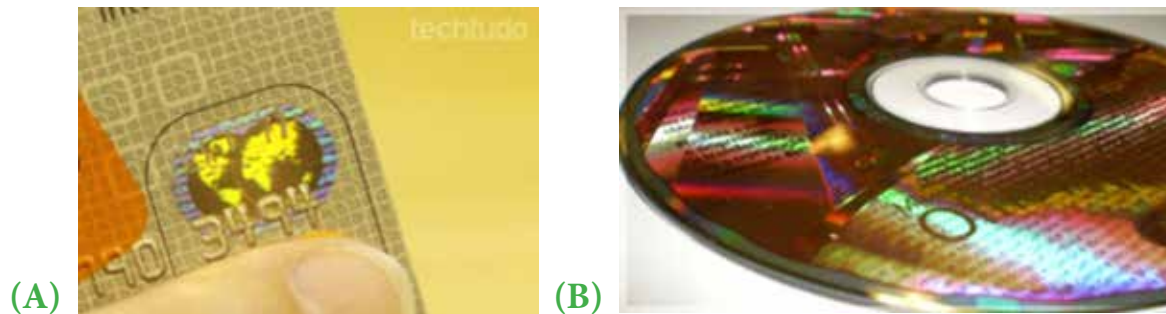
É comum que diante de tais fatos históricos alguns estudantes pensem que o cientista, no caso Gabor, tenha sido um grande gênio e que, como num passe de mágica, tivesse elaborado a teoria para a construção do

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.



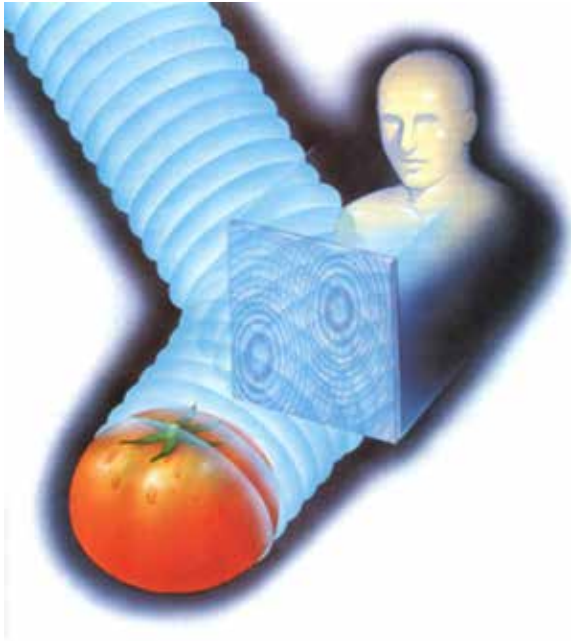


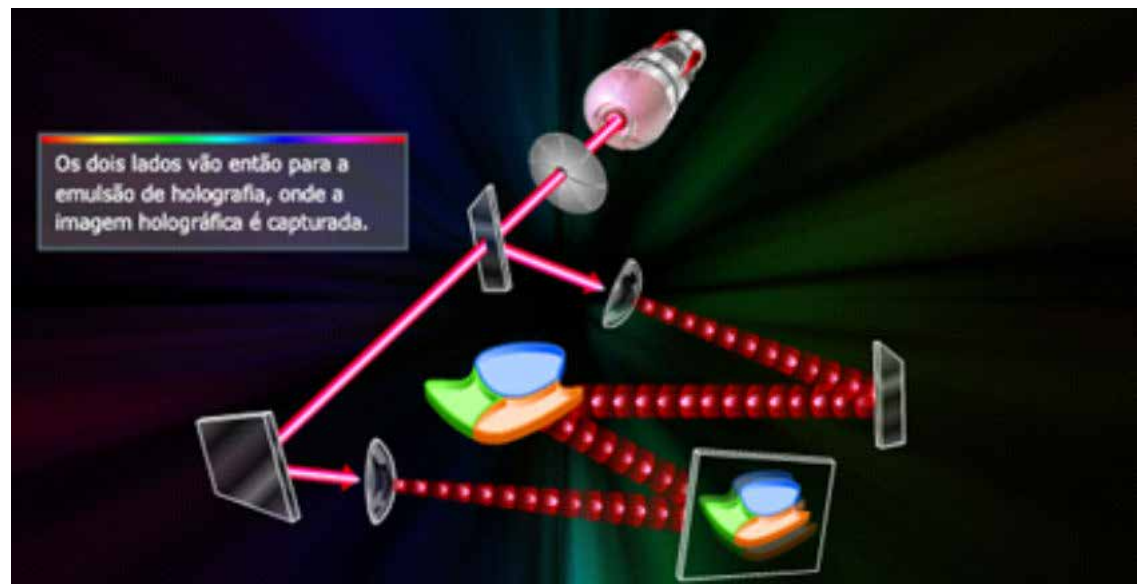
Figura 98 - Reprodução da imagem holográfica a partir do registro gravado.

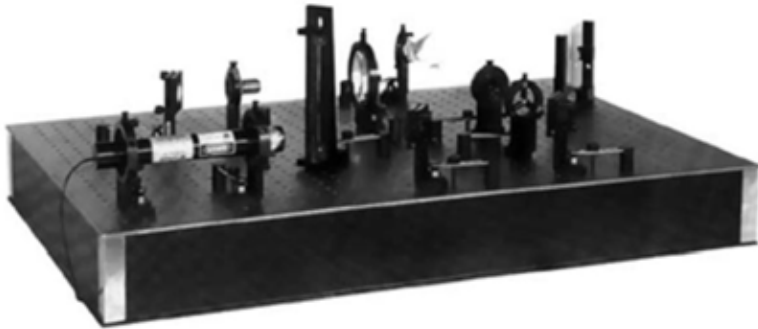
Fonte: Ciência e Natureza: Forças Físicas. 1996. p.125.

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,,E-MI187440-17770,00-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.



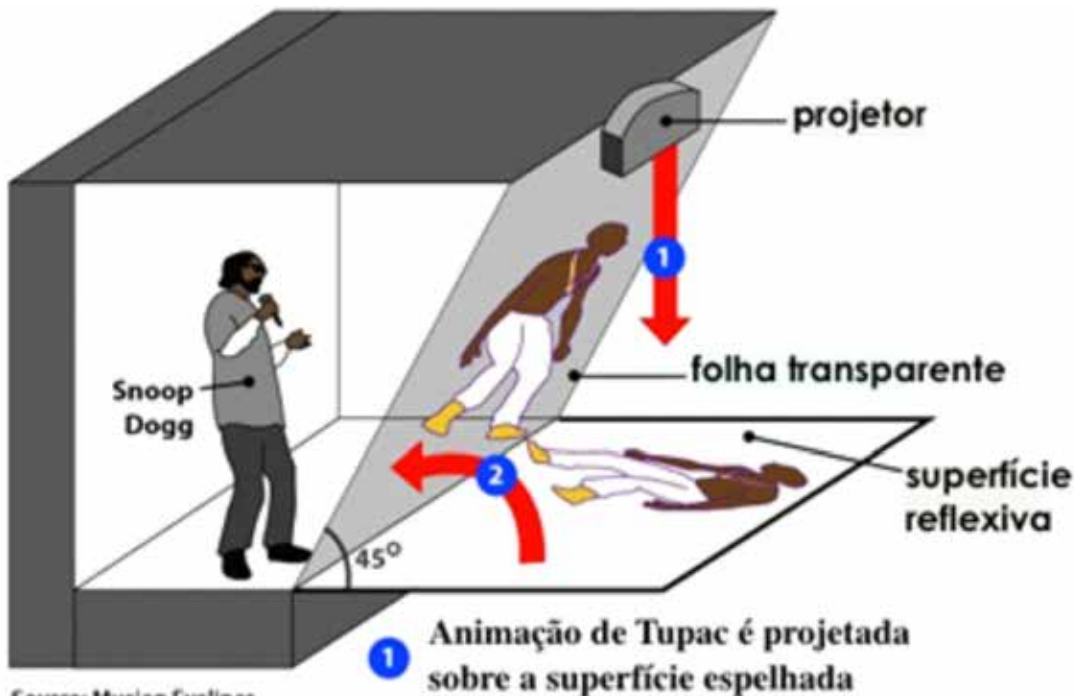
Figura 102 - Popstar japonesa criada virtualmente.

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° 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.



- 1 Animação de Tupac é projetada sobre a superfície espelhada
- 2 A imagem é refletida para a tela transparente, a qual é dobrada de tal modo que a audiência vê Tupac, mas não a folha de alumínio

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).
- GRAF. 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.