



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS  
CENTRO DE EDUCAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE  
CIÊNCIAS E MATEMÁTICA**

**KEVIA HELENA FRANCELINO PIMENTEL**

**MATERIAL INSTRUCIONAL COMO SEQUÊNCIA DIDÁTICA NO ESTUDO  
DA INTERFERÊNCIA UTILIZANDO SIMULADORES**

**MACEIÓ**

**2017**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS**  
**CENTRO DE EDUCAÇÃO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENSINO DE**  
**CIÊNCIAS E MATEMÁTICA**

**KEVIA HELENA FRANCELINO PIMENTEL**

**MATERIAL INSTRUCIONAL COMO SEQUÊNCIA DIDÁTICA NO ESTUDO**  
**DA INTERFERÊNCIA UTILIZANDO SIMULADORES**

Produto Educacional realizado sob orientação do Prof. Dr. Kléber Cavalcanti Serra e apresentado à banca examinadora como requisito parcial à obtenção do Título de Mestra em Ensino de Ciências e Matemática – Área de Concentração Ensino de Física, pelo Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências e Matemática do Centro de Educação da Universidade Federal de Alagoas.

Orientador: Prof. Dr. Kléber Cavalcanti Serra

**Maceió, AL**

**2017**

**Catálogo na fonte**  
**Universidade Federal de Alagoas**  
**Biblioteca Central**

Bibliotecária Responsável: Helena Cristina Pimentel do Vale

P644p Pimentel, Kévia Helena Francelino.  
Material instrucional como seqüência didática no estudo da interferência utilizando simuladores / Kévia Helena Francelino Pimentel. – 2017.  
45 f.: il.

Orientador: Kléber Cavalcanti Serra.  
Produto educacional (Mestrado em Ensino de Ciências e Matemática) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Educação.  
Programa de Pós-graduação em Ensino de Ciências e Matemática. Maceió, 2017.

Bibliografia: f. 45.

1. Formação continuada. 2. Professores - Formação. 3. Aprendizagem significativa. 4. Transposição didática. 5. Simuladores – Ensino de Física. 6. Interferência luminosa – Ensino de Física. I. Título.

CDU: 372.853

## SUMÁRIO

1 TEXTO DE APOIO PRÉVIO PARA O PROFESSOR .....	4
1.1 Transposição de conceitos acerca de fenômenos ondulatórios, com ênfase na interferência .....	4
1.1.1 Natureza e Propagação da Luz .....	4
1.1.2 Onda, Raio e Frente de Onda .....	5
1.2 Fenômenos Ondulatórios .....	7
1.2.1 Reflexão .....	8
1.2.2 Refração .....	9
1.2.3 Polarização .....	12
1.2.4 Difração e Interferência .....	13
1.2.4.1 Interferência em uma Corda .....	16
1.2.4.2 Interferência Sonora .....	17
1.2.4.3 Interferência Luminosa .....	18
1.2.4.4 Diferença de Fase .....	18
1.2.4.5 Cálculo da Intensidade da Luz .....	19
1.3 Experimento da Fenda Dupla de Thomas Young .....	22
REFERÊNCIAS .....	26
2 OFICINAS .....	27
2.1 Oficina 1: apresentação da plataforma PhET .....	27
2.2 – Oficina 2: trabalhando com as Sims do PhET .....	27
2.2.1 – Oscilação em uma corda .....	27
2.2.1.1 Sequência de Atividades 1 .....	28
2.2.2 – Simulador Interferência de Ondas.....	31

2.2.2.1 Sequência de Atividades 2 .....	32
2.2.2.2 Sequência de Atividades 3 .....	35
2.3 Oficina 3: apresentação do Interferômetro Virtual de Mach- Zehnder .....	39
2.3.1 Sequência de Atividades 4 .....	41
REFERÊNCIAS .....	43

## 1 TEXTO DE APOIO PRÉVIO PARA O PROFESSOR

### 1.1 Transposição de conceitos acerca de fenômenos ondulatórios, com ênfase na interferência.

Como nosso produto é voltado para os professores, não necessariamente, consideramos que todos que o utilizem tenham formação em Física, portanto, optamos em conferir aqui o título de transposição de conceitos acerca do tema trabalhado, com uma proposta inicial, que o professor utilize o texto abaixo para se inteirar do assunto em questão.

#### 1.1.1 Natureza e Propagação da Luz

Os nossos olhos podem apreciar lindas cores, como o azul do céu, o verde das folhas e até mesmo as cores do arco-íris. O ramo da física que trata do comportamento da luz e de outras ondas é a óptica. Os princípios da óptica desempenham papel importante em muitas inovações modernas, tais como o *laser*, a fibra ótica, os hologramas, e ainda novas técnicas para obter imagens médicas.

Até a época de Isaac Newton (1642 – 1727), muitos cientistas acreditavam que a luz fosse constituída por pequenas partículas, chamadas corpúsculos, emitidas pelas fontes de luz. Em torno de 1665, surgiram as primeiras evidências das propriedades ondulatórias da luz.

James Maxwell, em 1873, fez previsões da existência das ondas eletromagnéticas e ainda estabeleceu a velocidade de propagação dessas ondas. Heinrich Hertz, em 1887, mostrou experimentalmente de maneira irrefutável, que a luz é uma onda eletromagnética.

Mas, a natureza ondulatória da luz não é suficiente para explicar tudo, pois efeitos associados com a emissão e a absorção da luz revelam seu caráter corpuscular, onde sua energia transportada é concentrada em pacotes discretos conhecidos como fótons ou quanta. Esses aspectos 'dual' da luz foram conciliados a partir de 1930, com o desenvolvimento da eletrodinâmica, teoria que explica de forma simultânea esses dois aspectos.

A propagação da luz pode ser descrita melhor utilizando um modelo ondulatório.

Uma fonte de luz que nos últimos 50 anos vêm se tornando cada vez mais importante é o *laser*; em quase todas as fontes luminosas, a luz é emitida por átomos diferentes no interior da fonte, mas no caso do *laser*, os átomos no interior da fonte são induzidos a emitir luz de modo organizado e coerente. O feixe do *laser* é monocromático (possui frequência única) diferentemente de um feixe produzido por qualquer outra fonte. O *laser* é utilizado por médicos para a realização de cirurgias, na reprodução do som de um CD, na indústria para cortar e fundir materiais, como o aço, dentre muitas outras aplicações.

No século XIX, Jean Foucault na França e Albert A. Michelson nos Estados Unidos realizaram uma experiência para medir a velocidade de propagação da luz. De acordo com as medidas realizadas até 1983, o valor da velocidade da luz era  $c = 2,99792458 \times 10^8$  m/s. Hoje, sabemos que a luz se propaga no vácuo com uma velocidade aproximada de  $3 \times 10^8$  m/s, tendo uma frequência característica de  $10^{14}$  Hz e comprimentos de onda (distância entre duas cristas consecutivas) de décimos de micrometro.

### **1.1.2 Onda, Raio e Frente de Onda**

Usamos a frente de onda para descrever a propagação de uma onda. Podemos definir a frente de onda como o lugar geométrico de todos os pontos adjacentes que possuem a mesma fase de vibração de uma grandeza física associada com a onda.

A fim de visualizarmos uma frente de onda, consideremos a situação de uma pedra caindo em um lago de águas calmas, como mostrado na figura. Observamos círculos que se expandem a partir do centro formando as cristas das ondas, assim como os círculos formados nos vales entre as cristas.

**Figura 1- Frentes de onda em um lago.**

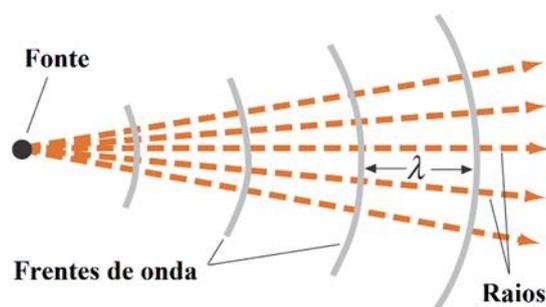


Fonte: TIPLER, v.2, 2006

No movimento ondulatório desenham-se apenas partes das frentes de onda, escolhendo-se frentes de onda consecutiva que possuem a mesma fase, a distância entre ela é igual a um comprimento de onda,  $\lambda$ . Para ondas eletromagnéticas devem-se indicar somente cristas para quais o campo magnético e o campo elétrico atingem seus valores máximos.

Para descrever a direção de propagação da luz, representa-se a onda de luz por meio de um raio em vez de se usar uma frente de onda, como mostrado na figura 2. Na descrição corpuscular da luz, os raios representam as trajetórias das partículas. No comportamento ondulatório, um raio é uma linha imaginária ao longo da direção de propagação da onda. O ramo que trata especificamente das propriedades ondulatórias da luz é a óptica ondulatória.

**Figura 2 – ondas de luz por meio de raios.**



Fonte: TIPLER, v.2, 2006

## 1.2 Fenômenos Ondulatórios

Quando a luz se difrata<sup>1</sup> ou se polariza<sup>2</sup>, ela apresenta um comportamento característico de onda. Pelo fato das ondas sonoras apresentarem comportamento ondulatório mais evidente, a título de comparação, elas serão usadas para que possamos exemplificar as principais características das ondas e assim compreendermos e associarmos aos processos luminosos.

Podemos perceber as ondas sonoras, ou seja, ouvir o som produzido em determinado ambiente, mesmo que nos encontremos em outro. Contornar os obstáculos é interpretado como um desvio efetuado por essas ondas, denominado difração.

Do mesmo modo que as ondas eletromagnéticas, as ondas sonoras também se propagam de modo diferenciado, dependendo do meio. As mudanças de direção das ondas em função do meio no qual se propaga é denominada refração. O eco, um fenômeno que podemos observar quando uma onda sonora se propaga em uma região em que existem barreiras, como prédios ou montanhas, é interpretado como reflexão das ondas. Neste caso a onda ao encontrar a barreira, retorna do mesmo modo que uma bola ricocheteia ao bater em uma parede.

As ondas também podem se superpor, e como resultado podemos ter uma onda intensa ou fraca, a depender de determinadas condições. Assim, em shows musicais, é possível identificarmos regiões onde o som é mais intenso e outras onde ele é praticamente inaudível. Este fenômeno é denominado de interferência.

Falaremos de forma mais sucinta sobre esses fenômenos ondulatórios, dando ênfase à interferência da luz.

---

<sup>1</sup> Fenômeno característico do movimento ondulatório e que ocorre quando a luz encontra um obstáculo, desvia-se do movimento em linha reta e entra na região de sombra. Esta divergência é chamada de **difração**. Physics For Scientists and Engineer, 6e, p.1178, Serway and Jewett

<sup>2</sup> Quando a luz emitida por uma lâmpada comum, os campos elétricos que constituem a onda eletromagnética apontam em todas as direções sempre perpendiculares à direção de propagação. No entanto, é possível “polarizar” esta onda colocando no seu percurso filtros que permitem que o campo se propague apenas em uma determinada direção. Nesta situação diremos que a luz estará polarizada. <http://www.seara.ufc.br/tintim/fisica/polarizacao/polarizacao4.htm>

### 1.2.1 Reflexão

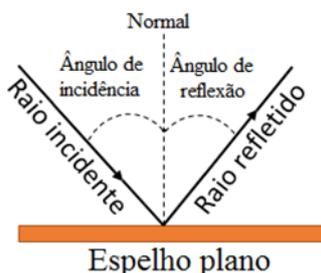
Quase todos os objetos ao nosso redor tornam-se visíveis porque eles refletem a luz. Para o estudo da reflexão da luz utilizaremos raios luminosos que incidem em superfícies lisas como vidros, plásticos ou metais polidos.

A reflexão é o fenômeno em que um raio de luz incide sobre uma superfície e volta ao meio de origem; o meio deve ser entendido como a região do espaço na qual a luz se propaga, podendo haver ou não matéria.

Quanto às leis da reflexão:

- O raio incidente, o raio refletido e a reta normal à superfície estão sobre o mesmo plano;
- O ângulo de incidência,  $\theta_i$  entre o raio incidente e uma reta N (chamada de reta normal) perpendicular à superfície, é igual ao ângulo de reflexão,  $\theta_r$  entre o raio refletido e a reta N. Como mostrado na figura 3:

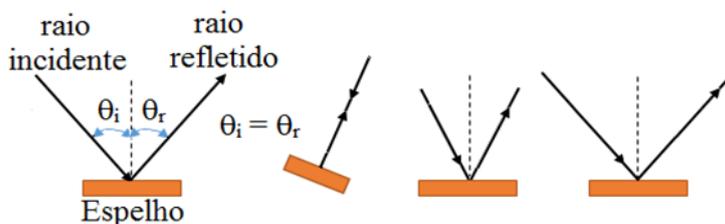
**Figura 3 – Leis da reflexão**



Fonte: autora, 2017

Com a variação do ângulo de incidência  $\theta_i$ , o ângulo de reflexão  $\theta_r$  varia da mesma maneira, mantendo a relação de igualdade  $\theta_i = \theta_r$ . Na figura 4, mostramos diversas maneiras de como a reflexão pode ocorrer.

**Figura 4 – Reflexão da luz em função do ângulo de incidência.**



Fonte: autora, 2017

### 1.2.2 Refração

Quando a luz atinge uma superfície lisa transparente, separando dois meios como ar e o vidro ou água e o vidro ela sofre refração. Observamos que a luz sofre uma mudança de percurso aproximando-se ou afastando-se da linha normal à superfície. Sofre refração. O fenômeno da mudança de propagação pela luz, ao passar de um meio para outro, denominamos de refração.

A figura 5 nos mostra o que vemos quando observamos um objeto colocado dentro de um copo com água. A impressão que temos é que o lápis parece estar “quebrado”. Isto acontece porque há um acentuado desvio entre a parte da imagem do objeto dentro da água e da parte que permanece fora. A direção do raio de luz, que traz a imagem do lápis até nossos olhos sofre um desvio que nossa visão e nosso cérebro não são capazes de perceber.

**Figura 5 – Fenômeno da refração**



Fonte: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/5/5c/RefractionVerre.jpg/350px-RefractionVerre.jpg>. Acessado em 27 de março de 2017.

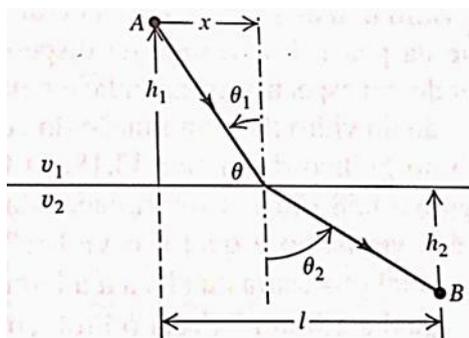
Este fenômeno pode ser explicado no princípio de Fermat<sup>3</sup> do tempo mínimo que estabelece que quando um raio de luz se deslocando em um meio com velocidade  $v_1$  parte de um ponto A e atinge um ponto B de outro meio com velocidade  $v_2$ , o tempo que a luz leva para ir de A até B será mínimo quando que estabelece que

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

Esta expressão é conhecida como lei de Snell da refração e corresponde à trajetória real do raio.

<sup>3</sup> Sears e Zemansky - Física IV, Ótica e Física Moderna, V4, p.33, Young e Freedman

**Figura 6 – Representação do princípio de Fermat.**



Fonte: autora, 2017

Quanto às leis da refração:

- O raio incidente, o raio refratado e a reta normal à superfície estão sobre o mesmo plano;
- Snell e René Descartes<sup>4</sup> perceberam, de maneira independente, que por meio da função seno era possível obter uma revelação entre os ângulos de incidência e refração:

$$\frac{\text{sen } i}{\text{sen } r} = \text{constante}$$

Essa constante está relacionada com o comportamento da luz e as características de cada meio. A razão entre as velocidades da luz em cada meio é conhecida como índice de refração, do meio 2 em relação ao meio 1.

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2} = n_{2,1}$$

O vácuo é o meio em que a luz se propaga mais rapidamente. Por isso, adotando-se o índice de refração do vácuo<sup>5</sup> como sendo igual a 1, podemos determinar o índice de refração para qualquer outro meio considerando que a velocidade da luz no vácuo  $c = 3 \times 10^8$  m/s de modo que

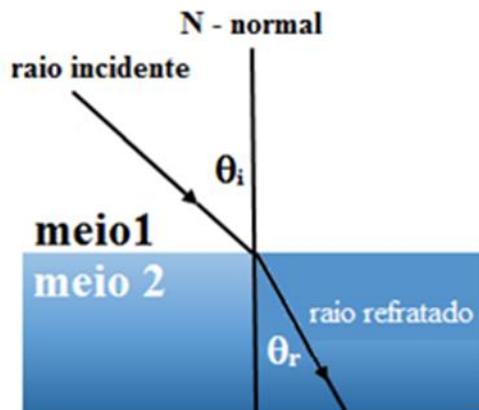
$$n = \frac{c}{v}$$

<sup>4</sup> Filósofo, físico e matemático francês.

<sup>5</sup> Na maioria dos problemas, podemos considerar o índice de refração do ar como sendo igual a 1.

Considere um raio de luz que se propaga de um meio 1 para o meio 2.  
Observe a figura 7:

**Figura 7 – Representação da refração.**



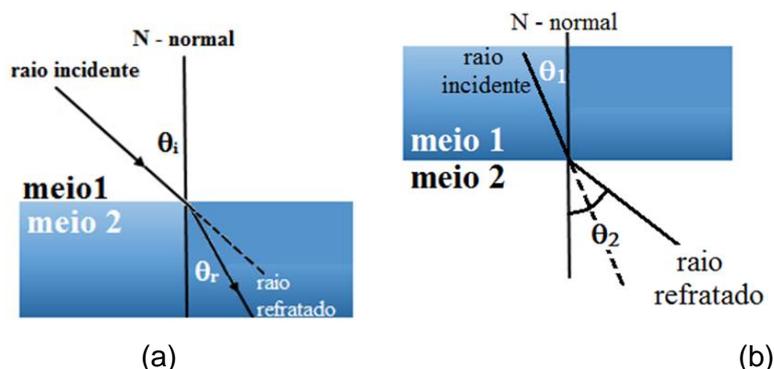
Fonte: autora, 2017

O desvio da trajetória inicial da luz depende dos valores dos índices de refração dos meios. Têm-se dois casos possíveis:

1. Se o raio de luz se propagar de um meio de menor índice de refração para outro de índice maior, o raio de luz se aproxima da reta normal. Se  $n_2 > n_1 \rightarrow \text{sen } i > \text{sen } r \rightarrow i > r$
2. Se o raio de luz se propagar de um meio de maior índice de refração para outro de menor índice, o raio de luz se afasta da reta normal. Se  $n_2 < n_1 \rightarrow \text{sen } i < \text{sen } r \rightarrow i < r$ .

Observe a representação nas figuras 8a e 8b:

**Figura 8 – Mudança de direção do raio luminoso na refração.**



Fonte: autora, 2017

As linhas tracejadas representam o caminho do raio de luz caso o mesmo não sofresse o desvio da refração. O meio em azul representa o de maior índice de refração.

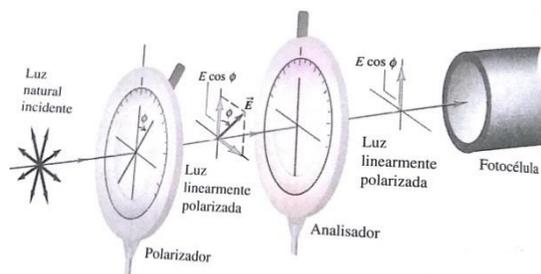
### 1.2.3 Polarização

Polarização é uma característica de todas as ondas eletromagnéticas, assim como a luz, que são ondas transversais, ou seja, ondas em que a direção de propagação é perpendicular à direção do movimento de vibração ou perturbação das partículas.

O som é uma onda longitudinal (onda em que o movimento de vibração ocorre na mesma direção de sua propagação), e, portanto, não pode ser polarizada, isto é, não ocorre o fenômeno da polarização com as ondas sonoras.

A polarização é um processo que ocorre quando a luz interage com certos materiais. No caso da luz, o filtro polarizador mais comum é chamado polaroide que transmite mais de 80% da intensidade da luz polarizada em uma direção paralela a certo eixo do material, chamado de eixo polarizador, mas menos de 1% é transmitida quando a luz é polarizada em um eixo perpendicular a esse eixo. Observe a representação da transmissão e o eixo polarizador na figura 9.

**Figura 9 – Um analisador ideal que transmite somente os componentes paralelos a seu eixo de polarização.**



Fonte: YOUNG e FREEDMAN, 2004, pag. 14.

Quando dois filtros são colocados em sequência a um feixe de luz não-polarizada, o primeiro elemento é chamado de polarizador e o segundo é chamado de analisador.

Se o polarizador e o analisador são cruzados, ou seja, seus eixos de transmissão são perpendiculares um ao outro, o detector não registrará nenhuma luz. Afim de se determinar a intensidade do feixe transmitido ao passar pelo analisador a equação conhecida como Lei de Malus, descoberta por E. L. Malus (1775 – 1812) será utilizada.

$$I = I_0 \cos^2 \theta$$

Onde  $I_0$  é a intensidade do feixe de luz incidente.

Observe que quando os polarizadores estão cruzados, ou seja, quando  $\theta = 90^\circ$ , a intensidade do feixe transmitido será igual a zero e terá um valor máximo quando  $\theta = 0^\circ$

#### 1.2.4 Difração e Interferência

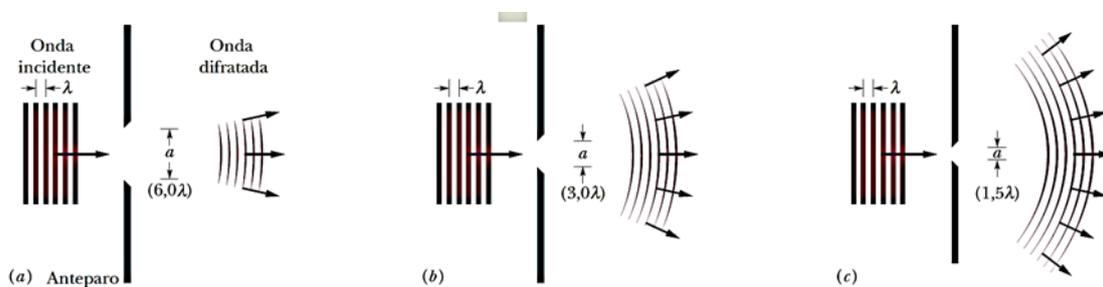
Luz é onda ou partícula?

O experimento que definitivamente mostrou que a luz tem comportamento ondulatório foi o fenômeno de difração que acontece quando uma onda encontra um obstáculo com uma pequena abertura e passa por uma fenda muito pequena quando comparada ao seu comprimento de onda, provocando a modificação no formato da frente de onda, obedecendo o princípio de Huygens.

Apesar de que o fenômeno de difração não estar limitado apenas às ondas luminosas, estaremos nos limitando a analisar este fenômeno apenas do ponto de vista da luz.

A condição para que a difração seja observada é que a fenda a ser atravessada tenha dimensões muito pequenas, e isto se deve ao fato de seu comprimento de onda ser também muito pequeno da ordem de micrometro. Na figura 10, podemos observar como o fenômeno da difração de uma onda plana por uma fenda fica mais evidenciado quanto menor for o tamanho da fenda quando comparado ao comprimento de onda incidente.

**Figura 10 – Difração de uma onda, quanto a largura da fenda.**

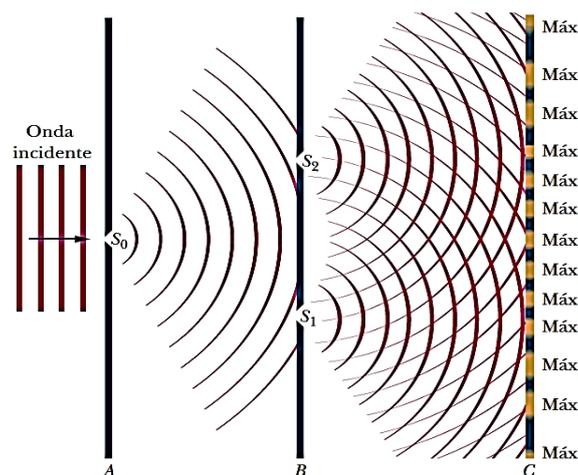


Fonte: HALLIDAY et al, 2012, pag. 77

Contrariando a ideia defendida por Newton e, conseqüentemente, por muitos cientistas da época de que a luz era constituída por partículas, Young, em 1801 não só mostra experimentalmente que a luz tem o comportamento ondulatório como também apresenta o fenômeno de interferência, determinando experimentalmente o valor médio do comprimento de onda da luz solar com excelente concordância com os valores então estabelecidos.

Na figura 11, mostramos um diagrama esquemático do experimento de Young.

**Figura 11 – Interferência de Young**



Fonte: HALLIDAY et al, 2012, pag. 78

Na figura observamos que quando a luz atravessa uma pequena abertura, sendo difratada gerando uma onda circular que será novamente difratada ao atingir novo obstáculo com duas fendas, e apresentará o fenômeno de interferência das ondas geradas pelas duas fendas que se comportam como se fossem fontes de ondas. As novas ondas reemitidas se propagam atingindo certos pontos do espaço que são identificados com a formação de regiões claras e escuras, demonstrando que em determinados pontos as ondas interferem construtivamente, ou seja, em fase (regiões claras) e outros pontos interferem destrutivamente, isto é, defasadas (regiões escuras).

A interferência é um fenômeno característico exclusivo das ondas, tanto das ondas mecânicas que dependem de um meio material para se propagarem, como das ondas eletromagnéticas que se propagam no vácuo. Ela é resultado da superposição de duas ou mais ondas. Como exemplos da interferência, os livros didáticos trazem, de forma corriqueira, as interferências causadas pelas ondas em cordas, ondas na água, ondas sonoras e das ondas luminosas através do experimento da dupla fenda (HEWITT, 2002; VILLAS BÔAS et al, 2010; GONÇALVES FILHO e TOSCANO, 2013).

Uma aplicação da interferência no mundo tecnológico é o uso de películas de monóxido de silício ou filmes finos em para-brisa de carros. A espessura dessas películas pode ser previamente calculada para que haja

interferência destrutiva da luz. Este recurso também é utilizado em filmes para vidros de janelas para a diminuição do aquecimento do ambiente.

Quando um conjunto de fontes, que produzem ondas de mesma frequência e comprimento, pode associar a este conjunto uma coerência<sup>6</sup>, ou seja, elas vibram em sincronia, em fase. Se as frentes de onda de duas fontes distintas chegam a um ponto em um mesmo instante (em fase) ou com certo atraso (defasadas), seus efeitos podem ser somados ou subtraídos, produzindo o que chamamos de interferência. Quando seus efeitos se somam, a interferência é considerada construtiva; quando ao contrário seus efeitos se subtraem, é considerada destrutiva (GREF, 2011).

Uma forma de analisarmos a interferência da luz é utilizarmos exemplos desse fenômeno em ondas mecânicas, como ondas sonoras, por serem mais rotineiras.

#### **1.2.4.1 Interferência em uma Corda**

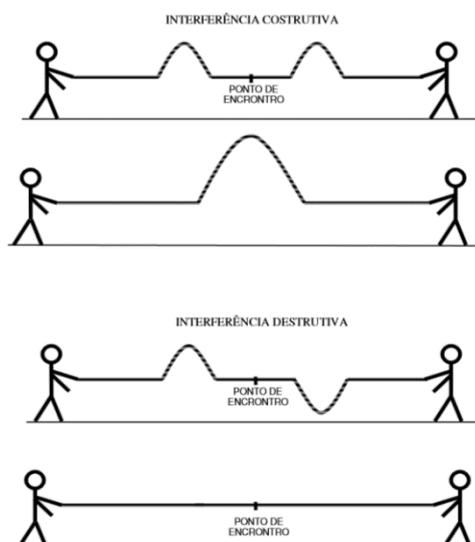
Observe a figura 12, e considere ondas sendo geradas nas extremidades da corda, e estas ondas se propagam na mesma direção, com mesma amplitude e frequência, mas em sentidos opostos.

Assim, essas ondas quando estão em fase ocorre superposição formando uma interferência construtiva. Caso essas ondas estejam fora de fase ou defasadas de  $180^\circ$  ou  $\pi$  rad (radianos) ou ainda  $\lambda/2$ , elas se anulam formando uma interferência destrutiva.

---

<sup>6</sup> Um conceito importante para observarmos a interferência luminosa é que a diferença de fase entre as ondas seja mantida constante ao longo do tempo. Se essa diferença de fase for constante, dizemos que os feixes são coerentes ou que as ondas são coerentes. O *laser* é naturalmente uma fonte de luz coerente. A condição de ondas coerentes é geral para a interferência e não somente para ondas luminosas. Mais adiante discutiremos melhor a coerência da luz.

**Figura 12 – Interferência construtiva e destrutiva em cordas.**



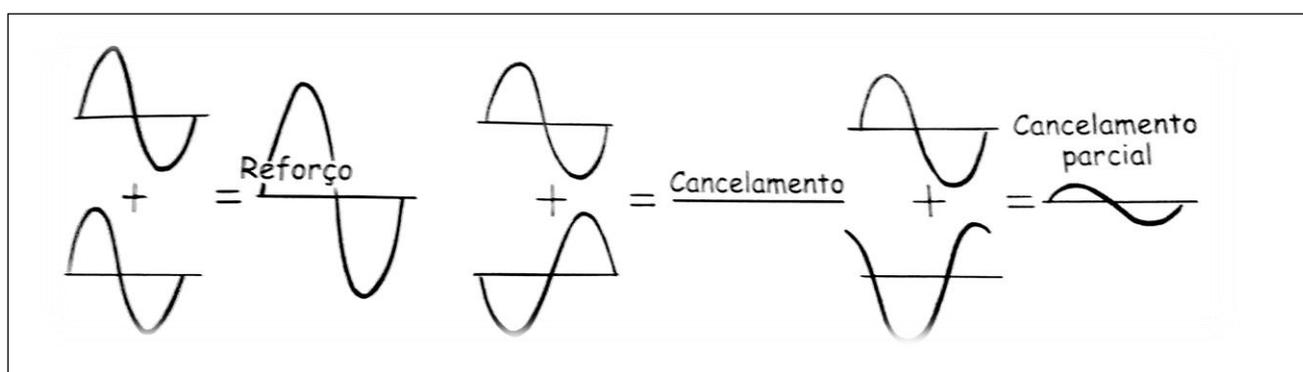
Fonte: HOFFMAN, 2010, pag. 90

#### 1.2.4.2 Interferência Sonora

As ondas sonoras também podem apresentar interferência, mesmo sendo uma onda longitudinal, onde a crista da onda sonora corresponde a uma zona de compressão, e seu vale corresponde a uma zona de rarefação.

Temos uma interferência construtiva quando as ondas estão em fase; temos interferência destrutiva quando essas ondas estão defasadas de meio comprimento de onda  $\lambda/2$  ou  $\pi$  rad, com isso podemos observar a ausência total ou parcial do som. Observe a figura 13, abaixo:

**Figura 13 – Comportamento de duas ondas sonoras.**



Fonte: HEWITT, 2002, pag. 499.

A interferência destrutiva é muito útil nos protetores auriculares na tecnologia antirruído. As combinações dos sinais cancelam o barulho produzido pelos aparelhos barulhentos no ouvido da pessoa. Fones de ouvido já são comuns entre pilotos de avião e operadores de britadeiras; além da interferência destrutiva ser aplicada nos abafadores de som de automóveis, ventiladores e outros, onde a superposição das compressões e das rarefações cancelam cerca de 95% do barulho original (HEWITT, 2002).

Propomos a título de comparação, que o leitor utilize a opção do simulador PhET<sup>7</sup> que mostra o fenômeno da interferência sonora para melhor entendimento desse princípio em áudio e vídeo, antes de chegarmos, enfim, na interferência luminosa (objetivo principal do nosso estudo utilizando também outro arranjo experimental, conhecido como Interferômetro Virtual de Mach-Zehnder<sup>8</sup>).

#### **1.2.4.3 Interferência Luminosa**

A interferência é um importante fenômeno que distingue ondas de partículas. A luz vive esta dualidade quanto ao seu comportamento, ora pode e comportar como onda, ora como partícula. Assim, alguns fenômenos dependem dessa característica peculiar da luz.

A interferência é a combinação de duas ou mais ondas que se encontram em certo ponto do espaço. Thomas Young observou e constatou a respeito da interferência da luz, em 1801, que a luz se propaga por movimento ondulatório, e não por movimento de partículas, como havia sido proposto por Newton. Assim, a superposição é uma propriedade do movimento ondulatório. Não existem situações semelhantes no movimento de partículas, ou seja, elas nunca se sobrepõem (TIPLER, v.1, 2006).

#### **1.2.4.4 Diferença de Fase**

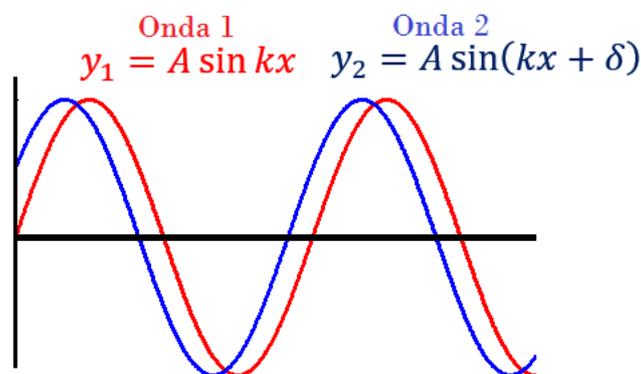
---

<sup>7</sup> Simulador Phet intitulado: Interferência de Ondas. Disponível em: [phet.colorado.edu](http://phet.colorado.edu)

<sup>8</sup> Simulador Intitulado: Interferômetro Virtual de Mach-Zehnder. Disponível em: [www.if.ufrgs.br/~fernanda](http://www.if.ufrgs.br/~fernanda)

O resultado da superposição de duas ondas de mesma frequência depende da diferença de fase  $\varphi$  entre elas. Se essa diferença de fase é zero ou um inteiro vezes  $360^\circ$ , as ondas estão em fase e interferem construtivamente. A amplitude resultante é igual à soma das amplitudes individuais, e a intensidade – proporcional ao quadrado da amplitude – é máxima. Se a diferença de fase é de  $180^\circ$  ou qualquer inteiro ímpar vezes  $180^\circ$ , as ondas não estão em fase e interferem destrutivamente. A amplitude resultante é então a diferença entre as amplitudes individuais, e a intensidade está em um mínimo. Observe a diferença de fase na figura 14 de duas ondas que têm a mesma amplitude, a mesma frequência e o mesmo comprimento de onda.

**Figura 14 – Duas ondas que diferem na fase.**



Fonte: autora, 2017

#### 1.2.4.5 Cálculo da Intensidade da Luz

Para entendermos melhor acerca da diferença de fase – mencionada anteriormente – vamos considerar duas funções de onda que diferem em fase, para calcularmos a intensidade da luz (*laser*) sobre uma tela em um ponto qualquer P.

Considere os vetores do campo elétrico integrados as ondas luminosas que chegam ao ponto P:

$$E_1 = E_0 \text{sen}(kx - \omega t) \quad (1)$$

$$E_2 = E_0 \text{sen}(kx - \omega t + \varphi) \quad (2)$$

Onde,  $\omega = 2\pi/T$  é a frequência angular das ondas e T seus períodos;  $k = 2\pi/\lambda$  é o número de onda;  $\varphi$  é a diferença de fase, sabendo que a mesma permanece constante, pois a onda luminosa produzida pelo *laser* é uma onda coerente;  $E_0$  é a amplitude do campo elétrico da onda, que é igual para as duas ondas.

Sabendo disso, podemos agora calcular o campo elétrico resultante no ponto P da tela utilizando algumas relações e identidades trigonométricas (TIPLER, v. 2, 2006).

O campo elétrico resultante é a soma das funções, temos:

$$E_p = E_1 + E_2$$

$$E_p = E_0 \text{sen}(kx - \omega t) + E_0 \text{sen}(kx - \omega t + \varphi) \quad (3)$$

A equação (3) pode ser simplificada pelo uso da identidade trigonométrica:

$$\text{sen } a + \text{sen } b = 2 \cos \frac{1}{2}(a - b) \text{sen } \frac{1}{2}(a + b)$$

Para esse caso,

$$a = kx - \omega t$$

$$b = kx - \omega t + \varphi$$

Logo,

$$\frac{1}{2}(a - b) = -\frac{1}{2}\varphi$$

$$\frac{1}{2}(a + b) = kx - \omega t + \frac{1}{2}\varphi$$

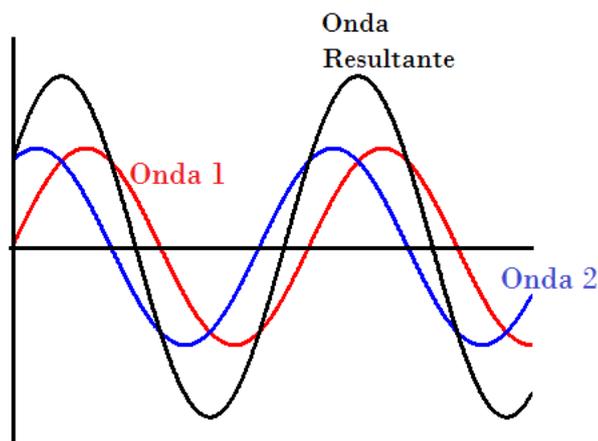
Assim, a função resultante, torna-se:

$$E_p = \left[ 2E_0 \cos \frac{1}{2}\varphi \right] \text{sen} \left( kx - \omega t + \frac{1}{2}\varphi \right) \quad (4)$$

Onde  $\left[ 2E_0 \cos \frac{1}{2}\varphi \right]$  representa a amplitude da onda resultante.

A Figura 15 representa a superposição das duas ondas descritas nas equações (1) e (2) cuja onda resultante está representada na equação (4) foram construídas usando o programa Mathcad15.0.

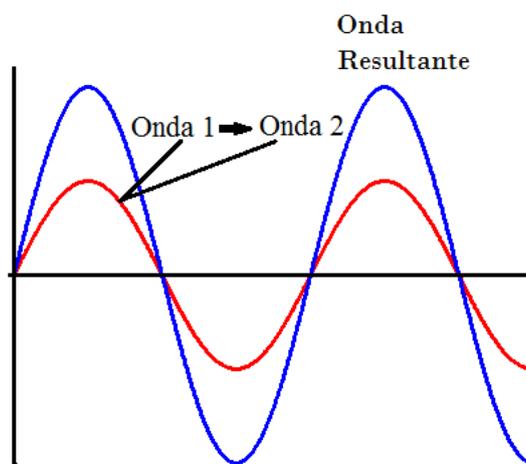
**Figura 15 – Interferência de duas ondas de amplitudes diferentes e uma diferença de fase  $\varphi$**



Fonte: autora, 2017

Se as duas ondas estão em fase, então  $\varphi = 0$ ,  $\cos 0 = 1$ , e a amplitude da onda resultante possui seu máximo valor  $2E_0$ . Essa interferência é chamada de interferência construtiva. Observe a figura 16 que representa esse fenômeno.

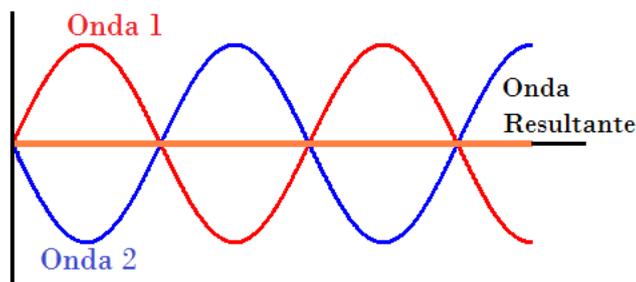
**Figura 16 – Interferência construtiva.**



Fonte: autora, 2017

Se as duas ondas estão fora de fase ou defasadas em  $180^\circ$ , então  $\varphi = \pi$ ,  $\cos\left(\frac{\pi}{2}\right) = 0$ , a amplitude da onda resultante será nula, ou seja, possui seu valor mínimo. A interferência de duas ondas defasadas é chamada interferência destrutiva. Observe o esquema representado na figura 17:

**Figura 17 – Interferência destrutiva.**



Fonte: autora, 2017

Uma vez que a intensidade da onda luminosa é proporcional ao quadrado da amplitude da onda resultante obtida pela equação (4), a intensidade no ponto P da tela é dada pela equação:

$$I = 4I_0 \cos^2 \frac{1}{2} \varphi \quad (5)$$

Onde,  $I_0$  é a intensidade da luz sobre a tela a partir de cada fenda.

Do resultado apresentado na equação (5) podemos concluir que a intensidade pode ser nula quando o cosseno for zero, e atingir o valor de  $4I_0$  quando o cosseno for +1 ou -1. Como o cosseno é uma função periódica, então existe uma alternância de máximos (que são as franjas claras), e mínimos (que são as franjas escuras).

### 1.3 Experimento da Fenda Dupla de Thomas Young

O experimento de Thomas Young foi importante para consolidar a teoria ondulatória da luz e demonstrar o cálculo de algumas grandezas como o comprimento de onda da luz.

As ondas que se espalham a partir de  $S_0$  geram frentes de ondas coerentes que passam através de duas aberturas  $S_1$  e  $S_2$ . A luz ao passar por  $S_0$  se difrata chegando como ondas esféricas em  $S_1$  e  $S_2$ , propagando-se no anteparo, no qual se observa um padrão de interferência descrito como uma alternância de regiões claras e escuras.

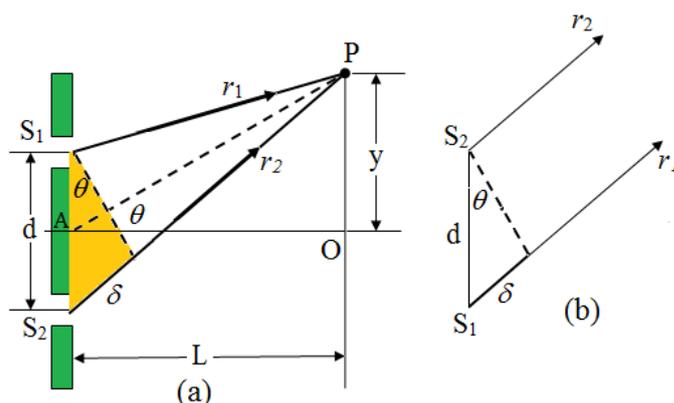
Para realizar essa experiência, Young utilizou a fenda A por não usar uma fonte de luz coerente, mas hoje com o *laser* essa fenda A com abertura  $S_0$  pode ser dispensada. Como as frentes de onda são coerentes, isto é, estão em fase, às interferências percebidas na tela dependem apenas da diferença em fase, às interferências percebidas na tela dependem apenas da diferença entre os caminhos percorridos pelos raios de luz  $\Delta x$ .

Onde

$$\delta = r_2 - r_1 = d \sin \theta \quad (6)$$

Aqui fizemos a suposição de que  $L$  é muito maior que  $d$  de modo que os raios  $r_1$  e  $r_2$  podem ser considerados como paralelos.

**Figura 18 – Diferença de caminho proporcionando as franjas de interferência.**



Fonte: autora, 2017

Na figura 23, para existir em P um máximo de intensidade (região clara), é necessário que  $\delta$  contenha um número inteiro de comprimentos de onda ou um número par de meios comprimentos de onda.

$$\delta = d \sin \theta = m\lambda, \text{ onde } m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (7)$$

Para que exista um mínimo de intensidade (região escura), é necessário que  $\delta$  contenha um número ímpar de meios comprimentos de onda.

$$\delta = d \sin \theta = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda, \text{ onde } m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (8)$$

Através de uma análise trigonométrica da figura 23 do experimento da fenda dupla podemos facilmente determinar os valores do comprimento de onda  $\lambda$  para que no anteparo OP mostrado na figura, tenham franjas claras (interferência construtiva) ou franjas escuras (interferência destrutiva).

Uma vez que  $L \gg d$ , podemos assumir que  $d \gg \lambda$ , uma vez que  $L \approx 1,0m$ ,  $d \approx 1mm$  e  $\lambda \approx 1\mu m$ . Portanto para esta situação temos que  $\sin \theta \approx \tan \theta$  e da figura temos que

$$y = L \tan \theta \approx L \sin \theta \quad (9)$$

Para que na posição  $y$  tenhamos uma franja brilhante, da equação (7) temos que

$$\sin \theta = \frac{m\lambda}{d} \quad (10)$$

Substituindo (10) em (9) obtemos

$$y_{claro} = \frac{\lambda L}{d} m \text{ com } m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (11)$$

O comprimento de onda da luz para a interferência construtiva é obtido por:

$$\lambda = \frac{y_{claro} d}{mL} \quad (12)$$

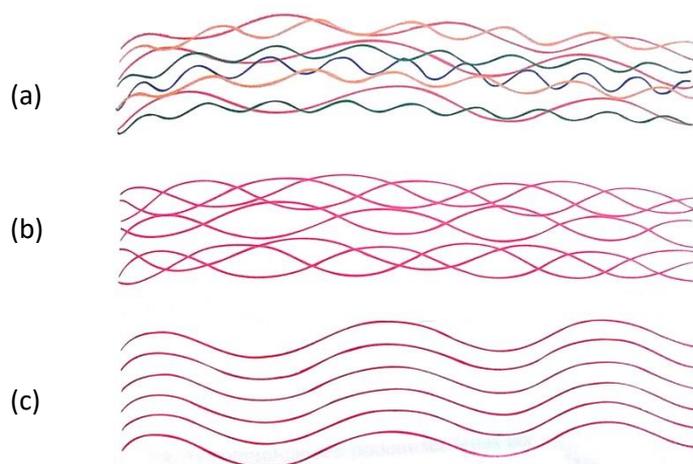
De modo semelhante, o comprimento de onda luminosa para a interferência destrutiva será dado substituindo (9) em (8) de modo que:

$$y_{\text{escuro}} = \frac{\lambda L}{d} \left( m + \frac{1}{2} \right) \text{ com } m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (13)$$

$$\lambda = \frac{y_{\text{escuro}} d}{L \left( m + \frac{1}{2} \right)} \quad (14)$$

A luz de uma vela, do sol ou a luz branca de uma lâmpada possuem vários comprimentos de onda, sendo ondas não coerentes. Observe o esquema da figura 19, comparando a propagação dessas ondas ao longo do tempo em um ponto fixo do espaço.

**Figura 19 – Comparando a propagação de diferentes ondas.**



Fonte: HEWITT, 2002, pag. 499.

Nesta figura, (a) representam ondas de uma luz branca, com diferentes comprimentos de onda, ou diferentes frequências e defasadas; (b) representam ondas de uma fonte de luz monocromática, com ondas que apresentam diversas defasagens; (c) representa uma fonte de luz monocromática, todas em fase. Essa é a representação da fonte de luz *laser*.

## REFERÊNCIAS

GONÇALVES FILHO, A.; TOSCANO, C. **Física 2: interação e tecnologia**, v. 2, 1 ed. São Paulo: Leya, 2013.

GRAF: Grupo de Reelaboração do Ensino da Física. **Física 2: física térmica; óptica**. 5 ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2011.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; KRANE, K. S. **Física 4**. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

HEWITT, P. G. **Física conceitual**. 9 ed. Porto Alegre: Bookman, 2002.

**Interferômetro Virtual de Mach-Zehnder**. Disponível em: [www.if.ufrgs.br/~fernanda](http://www.if.ufrgs.br/~fernanda)> acessado em 05 de abril de 2015.

PIETROCOLA, M.; POGIBIN, A.; OLIVEIRA, Renata C. A.; ROMERO, Talita R. L. **Física em contextos: pessoal, social e histórico: energia, calor, imagem e som**. 1 ed. São Paulo: FTD, 2010.

**Simulador Interferência de Ondas**. Disponível em: [phet.colorado.edu](http://phet.colorado.edu)> acessado em 12 de agosto de 2015.

TIPLER, Paul A.; MOSCA, G. **Física para cientista e engenheiros, v. 1: mecânica, oscilações e ondas; termodinâmica**. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

TIPLER, Paul A.; MOSCA, G. **Física para cientista e engenheiros, v. 2: eletricidade e magnetismo; ótica**. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

VILLAS BÔAS, N.; HELOU DOCA, R.; BISCUOLA, G. J. **Física 2**. 1ed, São Paulo: Saraiva, 2010.

YOUNG, Hugh D.; FREEDMAN, Roger A. SEARS e ZEMANSKY **Física IV: ótica e física moderna**. São Paulo: Pearson Addison Wesley, 2004.

## 2 OFICINAS

### 2.1 Oficina 1: apresentação da plataforma PhET

Nosso objetivo aqui é fazer com que o professor conheça o ambiente virtual, através do qual utilizaremos dois simuladores presentes na plataforma intitulada PhET – Educational Technology in Physics (Tecnologia Educacional em Física).

Apresentaremos a plataforma PhET através de uma vídeo-aula postada na plataforma de ensino online Moodle.

#### Oficina 1: vídeo-aula da plataforma PhET



Fonte: *Print screen* do programa.

Este vídeo tem duração aproximada de 5 minutos, nele não se propõe ensinar ao aluno ou professor a usar o PhET, mas apenas mostrar inicialmente a proposta do produto (que pode ser pesquisada em detalhes na página do PhET).

### 2.2 – Oficina 2: trabalhando com as Sims do PhET

#### 2.2.1 – Oscilação em uma corda

Se você não estudou o conceito de ondas no Ensino Médio ou mesmo na Universidade, vamos mostrar através de uma simulação no PhET que

poderemos discutir as propriedades ondulatórias usando vocabulário comum e ser capaz de prever o comportamento das ondas que se propagam em determinado meio (uma corda, por exemplo) e que se refletem nas extremidades.

Nessa vídeo-aula mostraremos o simulador que irá tratar do movimento ondulatório. Para isso utilizamos a simulação onda em uma corda presente no endereço eletrônico: [https://phet.colorado.edu/pt\\_BR/simulation/wave-on-a-string](https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/wave-on-a-string).

### Oficina 2 (parte 1): vídeo-aula oscilações em uma corda



Fonte: *Print screen* do programa.

Esse vídeo tem uma duração aproximada de 30 minutos e nele procuramos mostrar como podemos propor uma atividade sobre a propagação de uma onda em uma corda.

#### 2.2.1.1 Sequência de Atividades 1

Com base nessas atividades propostas, o professor pode tomá-las como referência ou elaborar sua própria atividade para a utilização do simulador acima.

1. Acesse o simulador em: [https://phet.colorado.edu/pt\\_BR/simulation/wave-on-a-string](https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/wave-on-a-string).

Consideremos a função PULSO e que não existe amortecimento. A ideia que temos ao realizar este procedimento é que todos os pontos da corda se movem para a direita. No entanto, vamos focar nossa atenção particularmente no ponto verde.

2. Crie um pulso e antes que ele atinja a extremidade direita e a altura máxima, faça uma pausa no vídeo. Use a função LENTO para ser mais fácil visualizar. Após a pausa faça o vídeo avançar um quadro (frame). Neste caso podemos concluir que o ponto verde escolhido estará\_\_\_\_\_.

- a) em uma posição mais baixa
- b) em uma posição mais alta
- c) se movendo para a direita
- d) na mesma posição
- e) se movendo para a esquerda

Considere agora um ponto verde desta oscilação que já esteja situado à esquerda do ponto mais alto da oscilação. Para esta situação podemos concluir que o ponto verde escolhido estará\_\_\_\_\_.

- a) em uma posição mais baixa
- b) se movendo para a direita
- c) em uma posição mais alta
- d) na mesma posição
- e) se movendo para a esquerda

Portanto quando um pulso se propaga em um determinado meio (a corda por exemplo), os pontos deste meio\_\_\_\_\_ (não oscilam/oscilam) para cima ou para baixo, mas\_\_\_\_\_(se movem/não se movem) na direção do pulso.

3. Então a pessoa gera um novo pulso com mesmo modo que gerou o primeiro, porém fazendo uma amplitude (a altura do pulso) maior do que da primeira vez. Para esta situação podemos concluir que o pulso será\_\_\_\_\_ (mais alto/do mesmo tamanho/mais baixo). Se a pessoa gera outro pulso como o primeiro,

mas a corda é movida mais rapidamente, podemos concluir que para esta situação o pulso\_\_\_\_\_ (será mais estreito/será mais largo/terá a mesma largura). Um novo pulso é gerado, porém a corda agora está mais esticada. Nesta situação o pulso se moverá\_\_\_\_\_ (mais rápido/com a mesma velocidade/mais devagar).

4. A conclusão que podemos chegar com relação à atividade 3 quando a corda é esticada é que a frequência\_\_\_\_\_(não muda/aumenta/diminui), mas a frente de onda percorrerá uma distância\_\_\_\_\_ (menor/igual/maior). Ainda considerando esta situação podemos concluir que o período, o tempo que o ponto leva para realizar uma oscilação completa,\_\_\_\_\_ (diminui/aumenta/não muda).

Agora vamos gerar uma onda modulando uma simulação para oscilador e observando o comportamento de um determinado ponto (procure observar um ponto verde e coloque a extremidade infinita).

5. Inicie o vídeo e logo em seguida faça uma pausa e avance um quadro (frame). Para esta situação o ponto que está à esquerda do ponto de maior altura estaria\_\_\_\_\_ em relação ao oscilador:

- a) se movendo para baixo
- b) se movendo para cima
- c) na mesma posição
- d) se movendo para a direita
- e) se movendo para a esquerda

6. Se o oscilador começa a se mover mais rapidamente, os picos das ondas estarão\_\_\_\_\_ (mais afastados/mais juntos/igualmente separados).

Para a situação a seguir, coloque a extremidade como infinita e use o botão para passar quadro a quadro. Fica mais fácil de obter a resposta.

7. Se você diminui a frequência da onda na corda, você estará:

- a) diminuindo a velocidade

- b) aumentando o comprimento de onda
- c) diminuindo sua amplitude
- d) encurtando o período

Para resolver as próximas atividades sugerimos que você utilize a simulação PULSO.

Nestas atividades iremos considerar um pulso se propagando em uma corda onde na questão 8 iremos considerar que a extremidade está fixa e na questão 9 que ela está solta.

8. Considerando que a extremidade da corda esteja fixa, descreva como o pulso se movimenta após ser refletido.

9. Agora a extremidade direita da corda está solta, ou seja, ela pode se mover para cima e para baixo. Descreva o movimento do pulso após a reflexão.

### **2.2.2 – Simulador Interferência de Ondas**

Nosso objetivo aqui é mostrar ao professor, além das funcionalidades desta simulação Interferência de Ondas no PhET, falar sobre determinados conceitos atrelados ao fenômeno da interferência. Utilizaremos novamente vídeo-aulas postadas na plataforma de ensino online Moodle.

Existe no PhET duas possibilidades, quanto a natureza das ondas, trabalharmos com ondas mecânicas (água e som) ou eletromagnética (luz). Inicialmente, mostraremos aos professores a interferência sonora:

## Oficina 2 (parte 2): vídeo-aula interferências de ondas sonoras



Fonte: *Print screen* do programa.

Este vídeo tem aproximadamente 13 minutos mostrando aos participantes as possibilidades de utilização do PhET e em especial a interferência em ondas sonoras. O intuito aqui é fazer uma analogia promovendo um entendimento acerca do conteúdo abordado para se chegar ao fenômeno da interferência luminosa.

### 2.2.2.1 Sequência de Atividades 2

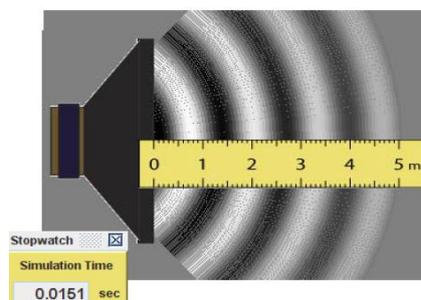
Essa sequência é uma ideia para que o professor possa inseri-la em seu planejamento didático, modificando-a da maneira desejada.

1. Acesse o simulador em:

[https://phet.colorado.edu/pt\\_BR/simulation/legacy/sound](https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/sound)

2. Inicie a simulação e insira o cronômetro clicando no mesmo. Quantas ondas sonoras existem? Faça a contagem e tome como exemplo para todas as questões a figura ao lado.

- a) 3
- b) 5
- c) 4



d) 8]

3. Qual é a velocidade do som?

- a) 300 m/s
- b) 330 m/s
- c) 0.0030 m/s
- d) 66 m/s

4. Qual a frequência das ondas sonoras aqui?

- a) 0,0037 Hz
- b) 66 Hz
- c) 260 Hz
- d) 300 Hz
- e) 330 Hz

5. Qual o período da onda sonora neste exemplo?

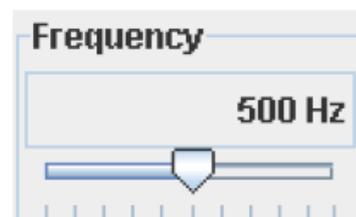
- a) 0,0151 s
- b) 0,0037 s
- c) 260 s
- d) 300 s
- e) 330 s

6. Qual o comprimento de onda, das ondas sonoras mostradas aqui?

- a) 5 m
- b) 1,3 m
- c) 1 m
- d) 0,71 m
- e) 300 m

7. Se eu parceiro de laboratório mover o cursor da frequência para a esquerda e passar de 500 para 250, o período seria?

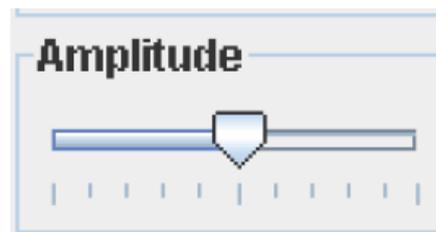
- a) Duas vezes maior
- b) 1/2 vezes maior
- c) Permanece o mesmo



- d) 1/4 vezes maior
- e) Não há informações suficientes para decidir

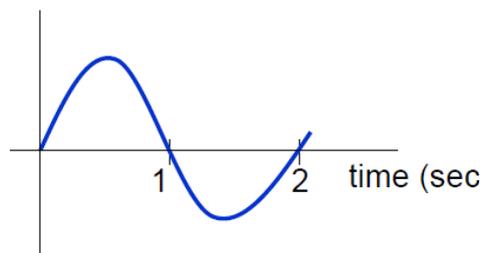
8. Se você mover o controle deslizante para a direita, dobrando a amplitude, o período seria?

- a) Duas vezes maior
- b) 1/2 vezes maior
- c) Permanece o mesmo
- d) 1/4 vezes maior
- e) Não há informações suficientes para decidir



9. Olhando para a forma da onda a seguir, qual o período? Suponha que ele se repete

- a) 1 s
- b) 2 s
- c) 1 m/s
- d) 2 m/s
- e) Não há informações suficientes



10. Olhando para a mesma onda da questão anterior, qual a sua velocidade?

- a) 1/2 m/s
- b) 2 m/s
- c) 5 m/s
- d) 20 m/s
- e) Não há informações suficientes

Atualmente, a plataforma PhET apresenta um simulador intitulado Interferência de Ondas, que reúne as simulações possibilitando a utilização de ondas em água, o som ou a luz.

## Oficina 2 (parte 3): vídeo-aula interferência de ondas luminosas

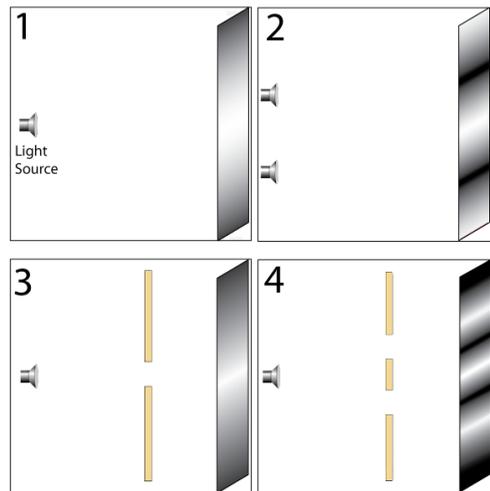


Fonte: *Print screen* do programa.

Nessa oficina 2 (parte 3), fizemos uso de uma vídeo-aula de aproximadamente 4 minutos, destacando apenas algumas funções do simulador, utilizando a propagação da luz. Com objetivos de que o professor: aplique o princípio de superposição; descreva como o brilho de uma fonte de luz é afetado pela distância; e, diferencie entre interferência construtiva e destrutiva.

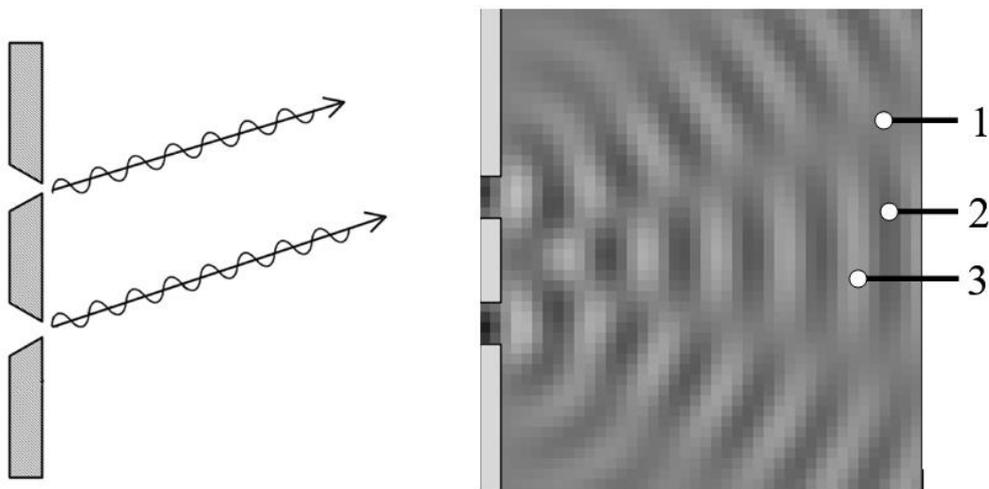
### 2.2.2.2 Sequência de Atividades 3

1. Abra a simulação e a explore para ter ideia dos controles em: [https://phet.colorado.edu/pt\\_BR/simulation/legacy/wave-interference](https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/wave-interference)
2. Considere as quatro imagens mostradas, onde uma fonte de luz amarela é colocada antes de uma tela. Em 3 e 4, uma barreira sólida é colocada entre a fonte de luz e a tela, com uma ou duas fendas. Compare os quatro cenários. Estamos interessados em suas ideias sobre o que está acontecendo. O que você acha que poderia estar acontecendo com a luz para criar esses padrões diferentes?



3. Tente recriar as imagens mostradas na figura acima com a simulação. Descreva o que você teve que fazer com a simulação para reproduzir tais imagens.
4. O que acontece com o padrão na tela quando as luzes são aproximadas ou mais afastadas umas das outras, figura número 2?
5. O que acontece com o padrão quando as fendas são aproximadas e afastadas?

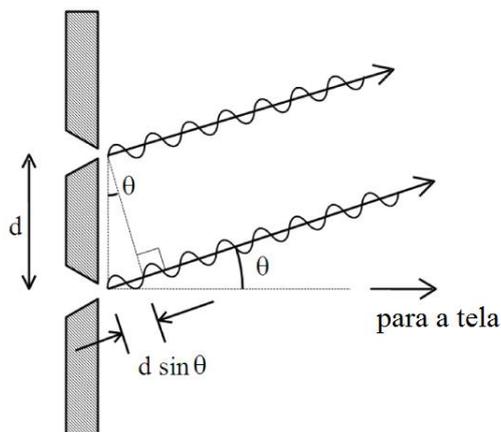
### Interferência com duas fendas



As imagens acima mostram duas maneiras de representar ondas de luz de duas fendas. Três pontos estão marcados com 1, 2 e 3 na imagem à direita.

6. Preveja o brilho da luz que você veria em uma tela nos pontos 1, 2 e 3.
7. Utilizando a simulação. Descreva como utilizando a figura da esquerda, você faria a previsão e explicaria o que está acontecendo nos pontos 1, 2 e 3 à direita.

Nas figuras da página anterior, os raios são emitidos em todas as direções a partir das fendas, porém iremos nos concentrar agora sobre os raios que são emitidos na direção  $\theta$  (medida em relação a normal a barreira como mostrado na figura abaixo). Um dos raios irá percorrer uma distância maior para atingir a tela, e a diferença de caminho é dado por  $d \sin \theta$ .

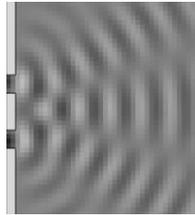


8. Faça uma previsão sobre o brilho na tela distante se a diferença de caminho é exatamente um comprimento de onda  $\lambda$  (ou qualquer número inteiro de comprimentos de onda)? Explique seu raciocínio.
9. Faça uma previsão sobre o brilho se a diferença de caminho é  $\lambda/2, 3\lambda/2, 5\lambda/2$  etc.

Qual das equações abaixo nos informa o ângulo para o qual você verá (I) um ponto claro e (II) um ponto escuro?

$$\left. \begin{array}{l} \text{Círculo 1: Claro ou Escuro} \\ \text{Círculo 2: Claro ou Escuro} \end{array} \right\} \begin{array}{l} d \sin \theta = m\lambda \\ d \sin \theta = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \end{array} \quad m = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$$

10. Como as equações acima suportam suas previsões de brilho e o padrão mostrado na figura?



### Simplificação para pequenos ângulos

Se  $\theta$  é pequeno ( $\theta \ll 1 \text{ rad}$ ), então  $\sin \theta \cong \theta$  (em radianos), e os pontos brilhantes ocorrem sobre a tela em:

$$\theta = m \frac{\lambda}{d}$$

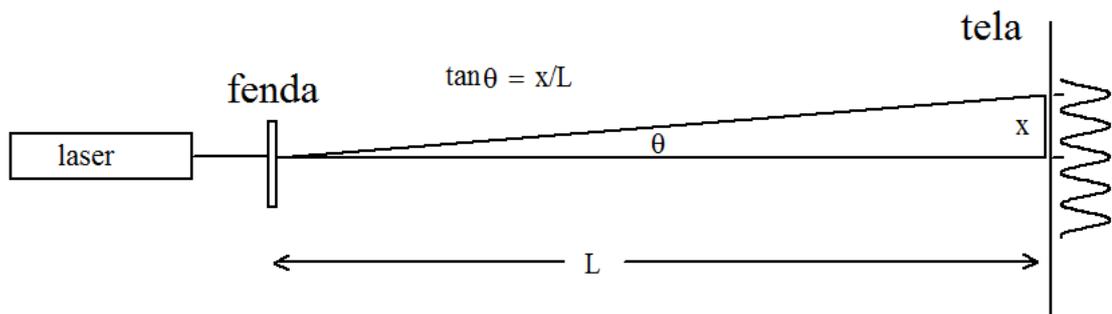
E os pontos escuros ocorrem em:

$$\theta = \left(m + \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda}{d}$$

Como mostrado na figura abaixo, o ângulo  $\theta$  (medido do centro da tela) está relacionado à distância  $x$  medida sobre a tela por:

$$\tan \theta = \frac{x}{L}$$

Onde  $L$  é a distância da tela à fonte de luz (fenda).



Se o ângulo  $\theta$  é pequeno (menor do que poucos graus), então uma aproximação excelente será:

$$\text{sen } \theta \approx \tan \theta \approx \theta \text{ em radianos}$$

De modo que as localizações dos pontos brilhantes serão dadas por:

$$\theta = \frac{x}{L} = m \frac{\lambda}{d}$$

11. O que acontece com o padrão de interferência se  $d$  aumenta? Se  $d$  diminui? Explique o seu raciocínio.

12. As respostas dadas em 11 são consistentes com as dadas nos itens 4 e 5?

### 2.3 Oficina 3: apresentação do Interferômetro Virtual de Mach-Zehnder

Nesta oficina apresentaremos através de uma vídeo-aula de aproximadamente 5 min e 30 segundos o Interferômetro Virtual de Mach-Zehnder para que os professores se familiarizem com o Software. E com o objetivo principal de trabalharmos o conteúdo de interferência luminosa, mostrando através dos anteparos os padrões formados pela luz.

#### Oficina 3: vídeo-aula acerca do Interferômetro Virtual de Mach-Zehnder



Fonte: *Print screen* do programa.

Tendo acesso livre ao Interferômetro Virtual de Mach-Zehnder pelo site: <http://www.if.ufrgs.br/~fernanda>, quando acessado apresenta as seguintes informações:

**Prof. Fernanda Ostermann**  
**Instituto de Física**  
**Universidade Federal do Rio Grande do Sul**

Interferômetro de Mach-Zehnder  
Copyright (c) 2005 Fernanda Ostermann e Sandra Denise Prado  
Projeto Edital Universal - 08/2004 do CNPq.

Fernanda Ostermann (Coordenadora do Projeto)  
Fávia Rezende (Vice-coordenadora)  
Sandra Denise Prado (Colaboradora)  
Trieste dos Santos Freire Ricci (Colaborador)  
Leandro Augusto Frata Fernandes (Programador)

Esse programa é distribuído gratuitamente e é destituído de qualquer garantia.  
Esse programa não é de domínio público.

Gostaríamos de agradecer ao CNPq pelo apoio ao projeto 'Tópicos de Física Moderna e Contemporânea na Formação de Professores e Fundamentos Epistemológicos para a Prática Docente'. Processo 475.851/04-8

Download aqui  
[Mach-Zehnder.exe](#)

Então, o professor, aluno, ou qualquer usuário que deseja conhecer o programa deve clicar em [Mach-Zehnder.exe](#) e aparecerá à opção de executar ou salvar o *Software*, podemos salvá-lo no nosso próprio computador ou pendrive, isto é importante para assegurar seu uso caso a página de acesso ao programa esteja indisponível.

### 2.3.1 Sequência de Atividades 4

Podemos trabalhar alguns roteiros readaptados para o Interferômetros Virtual de Mach-Zehnder. Manipulando tal simulação e respondendo questões atreladas ao conteúdo abordado no experimento.

#### Exemplos de Roteiros:

##### Roteiro 1

1. Acesse o site: <http://www.if.ufrgs.br/~fernanda>
2. Clique no aplicativo correspondente para executar o programa  Mach-Zehnder.exe ;
3. Com o *Software* em execução, observe todos os componentes do programa na faixa cinza, na parte inferior da tela;
4. Vá para View Point (Ponto de Vista) e modifique o idioma do inglês para o português em Language (idioma) para melhor entendimento;
5. Agora, clique em Ver Feixes para identificar o caminho seguido pelos raios de luz, ilustrado pela animação na propagação de um feixe colimado;
6. Identifique no aparato os divisores de feixes, ou seja, espelhos semi-refletores, justificando sua resposta.

##### Roteiro 2

1. Vá para Fonte e escolha a opção *Laser*;
2. Ainda em Fonte selecione a opção Ligado;
3. Observe o que acontece nos anteparos 1 e 2. Explique o que você vê<sup>9</sup>;
4. Qual fenômeno está envolvido no resultado desse experimento?
5. A luz apresenta qual comportamento?

##### Roteiro 3

1. Vá para Fonte e selecione a opção *Laser*;

---

<sup>9</sup> Lembre-se que o feixe de luz refletido no espelho totalmente refletor muda de fase por um fator  $\pi$  radianos, enquanto o outro feixe a mudança é de  $\pi/2$  radianos, que corresponde a um avanço de  $1/4$  do comprimento de onda da luz.

2. Em Instrumentos, desmarque removendo do experimento o espelho semi-refletor 2;
3. Volte para Fonte e clique em Ligado para executar a experiência;
4. Tente explicar o resultado observado nos anteparos;
5. Você saberia qual a intensidade da luz em cada um dos anteparos, nos casos com e sem o espelho semi-refletor 2, sabendo apenas que esse feixe de luz *laser* emitido pela fonte tem intensidade  $I_0$ ?
6. Compare os dois experimentos, com e sem o espelho semi-refletor 2. Que conclusões você pode chegar a respeito dos fenômenos observados?

#### Roteiro 4

1. Com a opção Fonte *Laser* selecionada;
2. Vamos inserir dois polaroides no experimento;
3. Marque as opções Filtro Polaroides 1 e Filtro Polaroides 2;
4. Agora ajuste os ângulos dos dois filtros, ambos a  $90^\circ$ , e depois ligue o interferômetro;
5. O que você observa nos anteparos?
6. Agora é possível dizer se a luz é ou não polarizada?

Observação: o professor pode incentivar seus alunos a montar seus próprios roteiros experimentais usando a Fonte *Laser* e os Filtros Polaroides 1, 2 e 3 para diferentes ângulos, com ou sem o espelho semi-refletor 2.

Além dos roteiros podemos sugerir uma atividade que apresente perguntas abertas referentes à interferência luminosa como:

1. Explique utilizando conceitos da Física Clássica o fenômeno da interferência?
2. Explique a diferença entre interferência construtiva e destrutiva.
3. Quanto ao padrão de interferência luminosa, explique por que aparecem no aparato (tela) franjas claras e escuras.
4. Que tipos de ondas podem apresentar interferência? Cite Exemplos.

## REFERÊNCIAS

HOFFMANN, S. K. **ÓPTICA FÍSICA COM O INTERFERÔMETRO VIRTUAL DE MACH-ZEHNDER**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

OSTERMANN, F.; PRADO, S. D.; RICCI, T. R. **INTERFERÔMETRO VIRTUAL DE MACH-ZEHNDER**. Disponível em: [www.if.ufrgs.br/~fernanda](http://www.if.ufrgs.br/~fernanda) (2005).

Plataforma PhET. Disponível em: [https://phet.colorado.edu/pt\\_BR/](https://phet.colorado.edu/pt_BR/)

Waves on a String. Disponível em:  
<https://phet.colorado.edu/en/contributions/view/2819>

Wave clicker questions. Disponível em:  
<https://phet.colorado.edu/en/contributions/view/3032>

Wave unit. Disponível em:  
<https://phet.colorado.edu/en/contributions/view/3023>