

Unidade II

7 O OLHO COMO INSTRUMENTO ÓPTICO

Para estudarmos óptica, é interessante procurarmos compreender o funcionamento do olho humano.

O olho atua como uma câmera, captando luz e emitindo pulsos elétricos para o cérebro, que faz a interpretação da imagem.

Nas figuras 41 e 42, temos as estruturas externa e interna do olho humano.

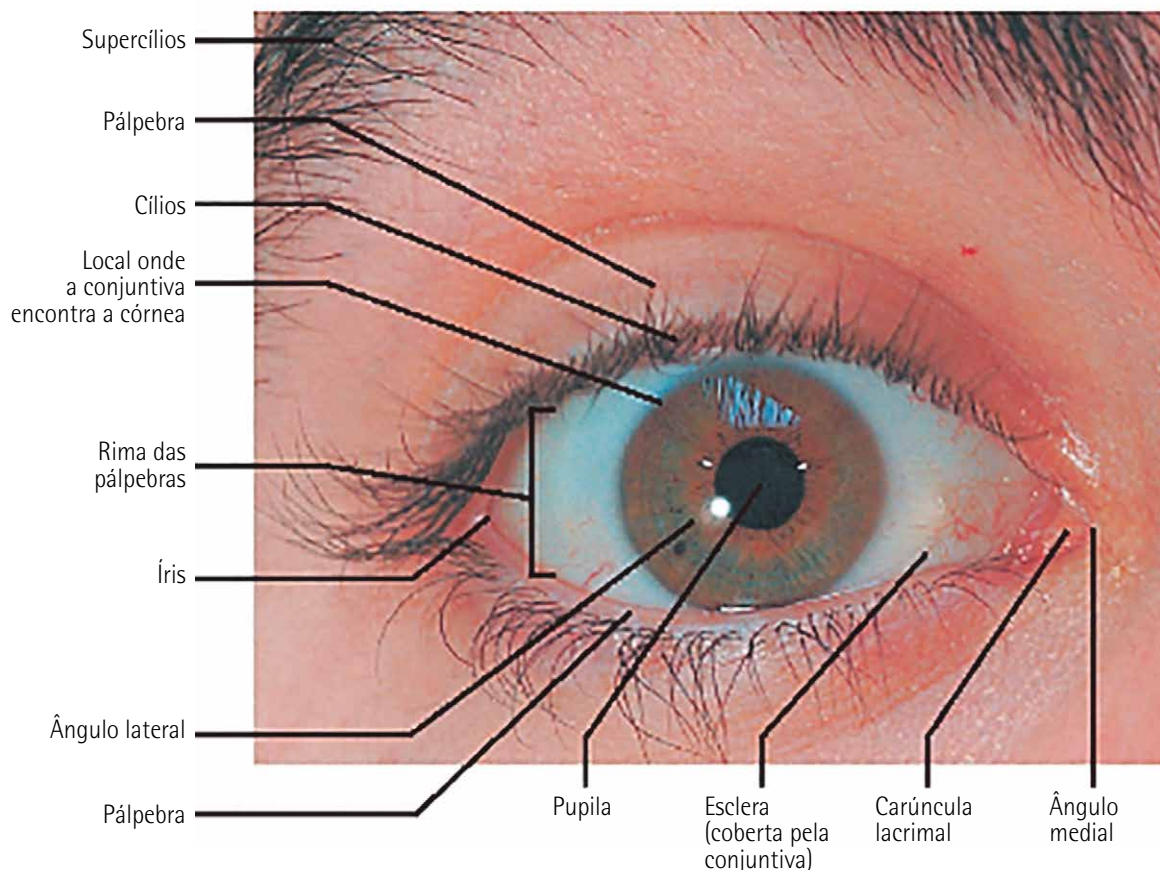


Figura 41 – Anatomia do olho direito

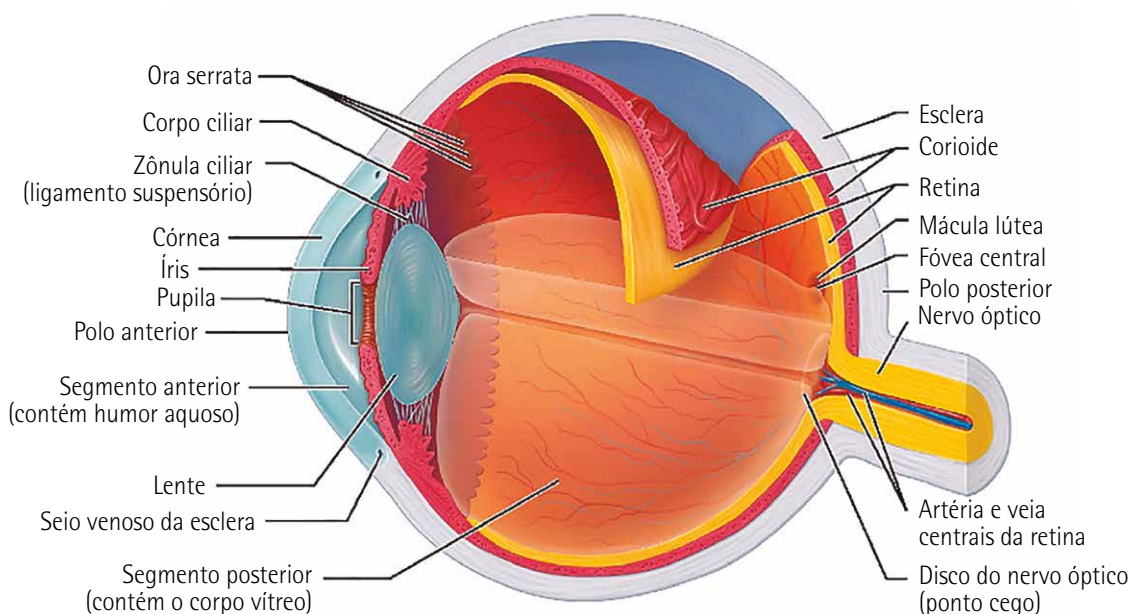


Figura 42 – Ilustração diagramática da estrutura interna do olho humano.
O corpo vítreo é ilustrado apenas em sua parte inferior

A luz incide no olho da esquerda para a direita na figura 42, atingindo o polo anterior do olho, onde se encontra a córnea. A parte anterior do olho tem formato curvo, é transparente e atua, junto com a lente do cristalino, para focar os raios de luz na parte traseira do olho. Essa luz incide na retina, onde se forma a imagem, e é interpretada como sinais elétricos. Tais sinais elétricos são transportados para o cérebro, que nos passa a percepção da imagem.

A pupila tem a capacidade de expandir-se ou contrair-se, regulando a quantidade de luz que entra no olho. Em ambientes de maior luminosidade, a pupila contrai-se, diminuindo a passagem de luz; já em ambientes de baixa luminosidade, a pupila dilata-se, fazendo com que o olho se adapte a esse ambiente de baixa luminosidade e capte mais luz.

A retina é composta basicamente de dois tipos de células sensíveis à luz, os cones e os bastonetes. Os cones são sensíveis às cores, enquanto os bastonetes têm eficiência maior na captação de luz. Os bastonetes não são capazes de captar cores. Por isso, não vemos cores com tanta intensidade em ambientes de baixa luminosidade.

A acuidade visual é a capacidade de identificarmos visualmente objetos, tanto pela sua cor quanto pelo seu contorno. Pessoas com baixa acuidade visual têm dificuldade, de menor ou de maior nível, para identificar visualmente objetos.

A estrutura do olho pode sofrer alterações que fazem com que a imagem formada não seja nítida, tais como miopia, astigmatismo ou hipermetropia. Isso faz com que a pessoa necessite do uso de lentes corretivas ou, ainda, de intervenções cirúrgicas para corrigir tal problema. Essas alterações de visão não são consideradas baixa acuidade visual.

O olho atua como um instrumento óptico, de forma que apresenta capacidade de resolução limitada. O limite de resolução de um instrumento óptico é a capacidade de separar dois objetos pontuais adjacentes.

Quando a luz passa por uma abertura circular, semelhante à pupila do olho, a imagem é formada sobre um padrão de difração (iremos tratar de difração mais adiante), chamado de difração de Fraunhofer para abertura circular (figura 43). O máximo central do padrão de Fraunhofer é chamado disco de Airy.

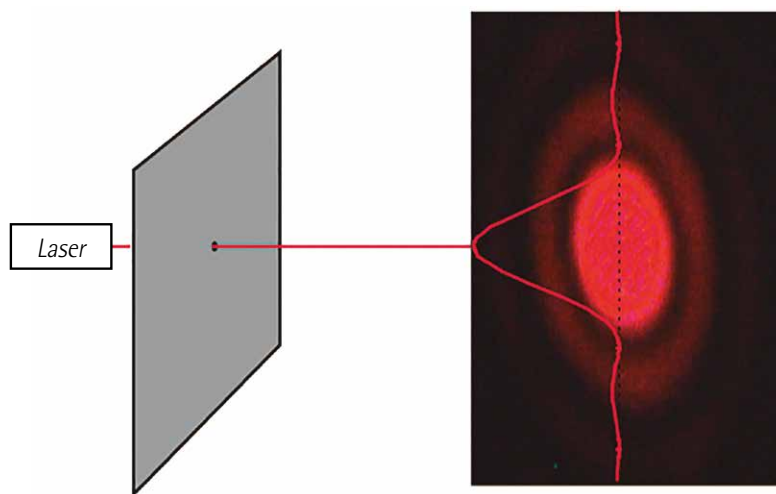


Figura 43 – Padrão de difração de Fraunhofer para abertura circular

Considerando duas fontes pontuais próximas, temos um padrão de difração para cada fonte de luz. Se as fontes estão muito próximas, o padrão de difração pode parecer de uma única fonte, conforme mostrado na figura 44.

Nesse caso, o critério que dá o limite de separação entre duas fontes de luz é o critério de Rayleigh, que diz que só podemos distinguir duas fontes de luz se o centro do padrão de difração de uma fonte se sobrepuser com um mínimo do padrão de difração da outra fonte (figura 44B).

Esse critério é dado pela equação a seguir.

$$\Delta\theta_R \sim 1,22 \frac{\lambda}{d}$$

Na equação:

- d é a abertura do sistema óptico (no caso do olho, é o diâmetro da pupila);
- λ é o comprimento de onda da radiação;
- $\Delta\theta_R$ é a separação angular máxima.

Logo, objetos com separação angular superior a $\Delta\theta_R$ podem ser resolvidos.



Observação

O símbolo matemático \sim significa aproximadamente.

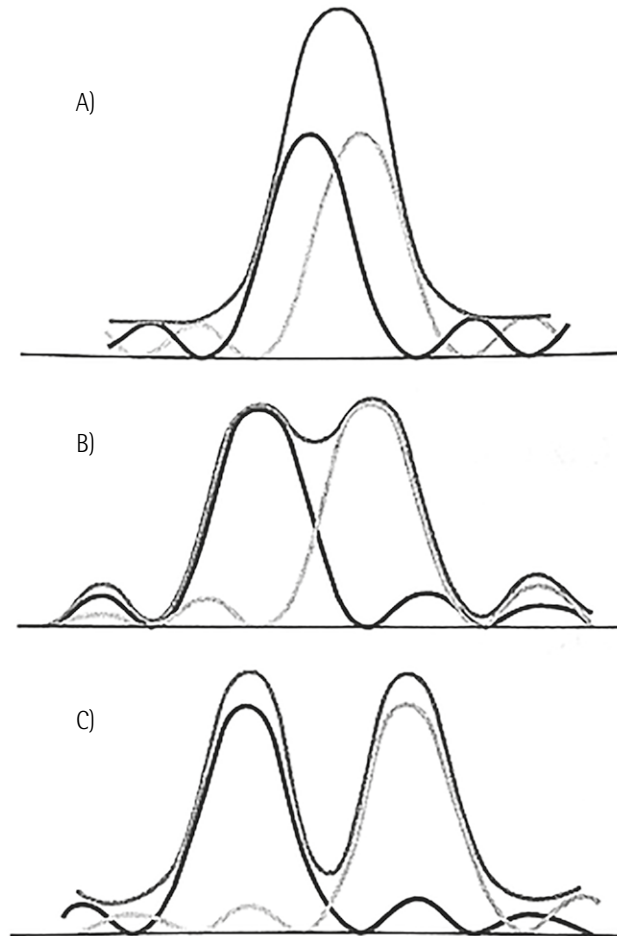


Figura 44 – Critérios de Rayleigh para resolução de duas fontes de luz pontuais adjacentes, sendo (A) duas fontes não resolvidas, (B) duas fontes apenas resolvidas, com o máximo do padrão de difração de uma fonte sobre o mínimo de outra, e (C) duas fontes claramente resolvidas

8 PRINCÍPIOS DA ÓPTICA GEOMÉTRICA

Óptica geométrica é um ramo da física que estuda a forma de propagação da luz; sua idealização é anterior ao conhecimento de que a luz é uma onda eletromagnética.

Na óptica geométrica, a luz pode ser representada por frentes de onda ou por raios de luz, conforme a conveniência. As frentes de onda podem ser exemplificadas pelo padrão que se forma ao atirmos uma pedra em uma superfície de água parada (figura 45); já o raio de luz pode ser entendido como um *laser* (figura 46).



Figura 45 – Frentes de onda sobre a superfície de um lago

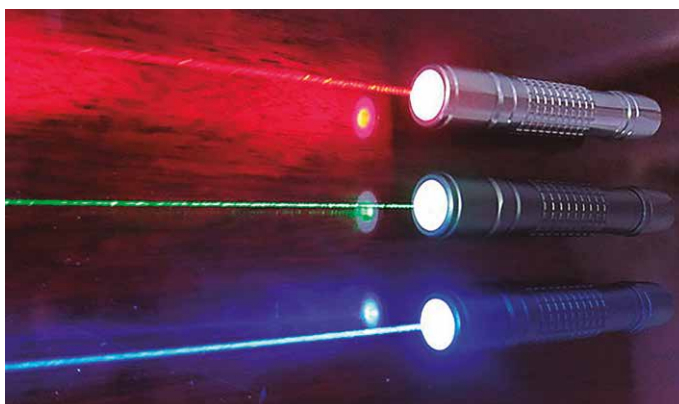


Figura 46 – Feixes de *laser*

Quando o comprimento de onda da luz é muito inferior às dimensões do sistema onde a luz se propaga e dos corpos com os quais ela interage, são válidas três leis da óptica geométrica:

- lei da propagação retilínea;
- lei da reflexão;
- lei da refração.

A lei da propagação retilínea diz que os raios de luz se propagam em linha reta em um meio homogêneo. A lei de reflexão diz que, em uma superfície que separa dois meios distintos, ocorre a reflexão parcial da luz. A lei da refração diz que o raio é refratado quando atravessa a interface de dois meios distintos. A seguir, detalharemos melhor essas duas últimas leis e os conceitos nelas envolvidos.

8.1 Reflexão

A lei da reflexão diz que, quando a luz atinge a interface entre dois meios, ela é parcialmente refletida. O plano de incidência é o plano definido pelo raio de luz e pela normal ao plano, e a radiação refletida está restrita a esse plano (figura 47).

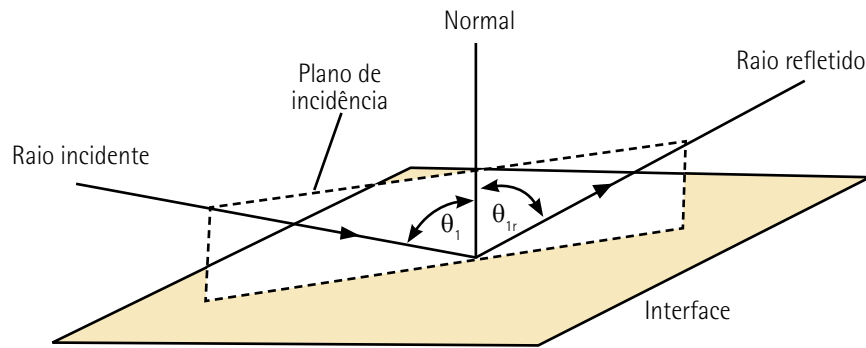


Figura 47 – Conceitos geométricos da reflexão

Se o raio incide com ângulo θ_i em relação à normal à superfície, o raio refletido terá ângulo θ_r em relação à normal à superfície, tal que:

$$\theta_i = \theta_r$$

Logo, o ângulo de incidência do raio de luz é igual ao ângulo de reflexão (figura 47).

8.1.1 Espelhos planos

Espelhos planos são o tipo de espelho mais frequentemente encontrado em nosso dia a dia, cuja principal propriedade é formar uma imagem de dimensões idênticas às dimensões do objeto original. Para analisar esse fenômeno, vamos usar P para representar um ponto do objeto original e P' para representar o mesmo ponto de sua imagem.

Na figura 48, temos o exemplo de formação de uma imagem por um espelho plano. A imagem formada no espelho também é conhecida como imagem virtual.

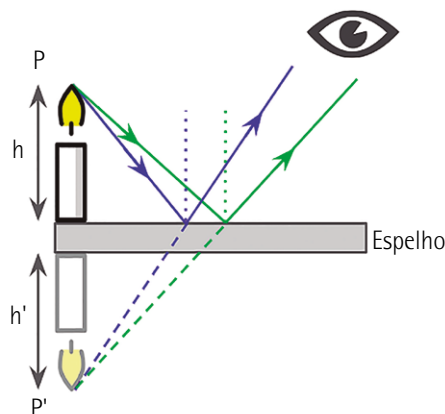


Figura 48 – Dois raios paralelos partindo de um objeto e sendo refletidos por um espelho plano, vistos por um observador

Consideremos dois raios de luz partindo do topo do objeto em direção ao espelho, em verde e azul na figura 48. Esses raios têm propagação retilínea. Ao atingirem o espelho plano, eles são refletidos de forma que o ângulo entre o raio incidente e a normal ao plano (em pontilhado) é o mesmo ângulo entre o raio refletido e a normal. São esses os raios refletidos que chegam ao observador. Prolongando os raios refletidos para dentro do espelho (em tracejado na figura) até o ponto em que eles convergem, temos um limite para a formação da imagem refletida (do espelho até o ponto P'). Vemos, então, que o tamanho h do objeto original é igual ao tamanho h' da imagem refletida. O observador vê, assim, a imagem refletida no espelho, que tem as mesmas dimensões da imagem original.

Para obter imagens ampliadas, podemos trabalhar com espelhos de geometrias diferentes, como espelhos de superfície curva.

O campo visual de um espelho plano é toda a área que pode ser vista por um observador a partir da imagem refletida por esse espelho.

O campo visual pode ser obtido aplicando as leis de reflexão aos raios que atingem as bordas do espelho, ou seja, os limites de sua área.

Na figura 49, vemos a representação do limite do campo visual de um espelho plano para um observador.

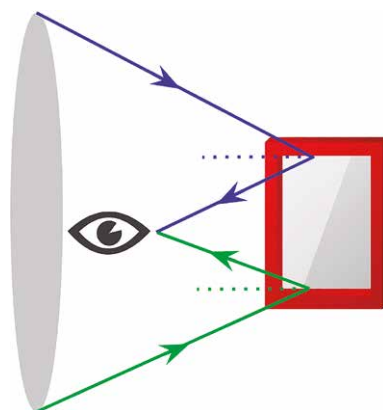


Figura 49 – Representação do campo visual, como uma elipse cinza, para um observador ao ver uma imagem refletida em um espelho plano

Espelhos planos têm a propriedade de aparentemente inverterem a imagem lateralmente, de forma que se você, em frente a um espelho, move sua mão direita, verá o movimento na mão à direita da sua imagem formada no espelho. Não ocorre, porém, inversão na direção vertical.

Conforme o ângulo de incidência da luz, a opacidade das superfícies e os índices de refração delas, a radiação pode ser apenas refletida, o que chamamos de reflexão total (figura 50). Veremos o cálculo desses parâmetros mais adiante.

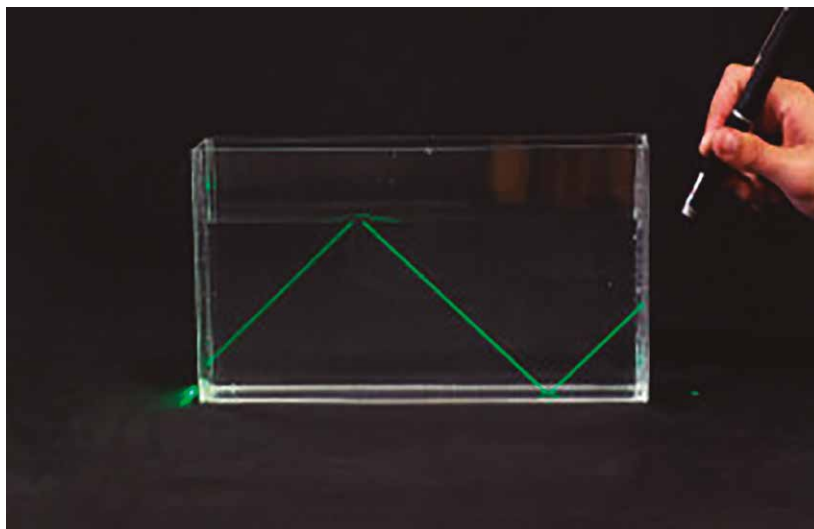


Figura 50 – Reflexão total de um feixe de laser em uma cuba de água

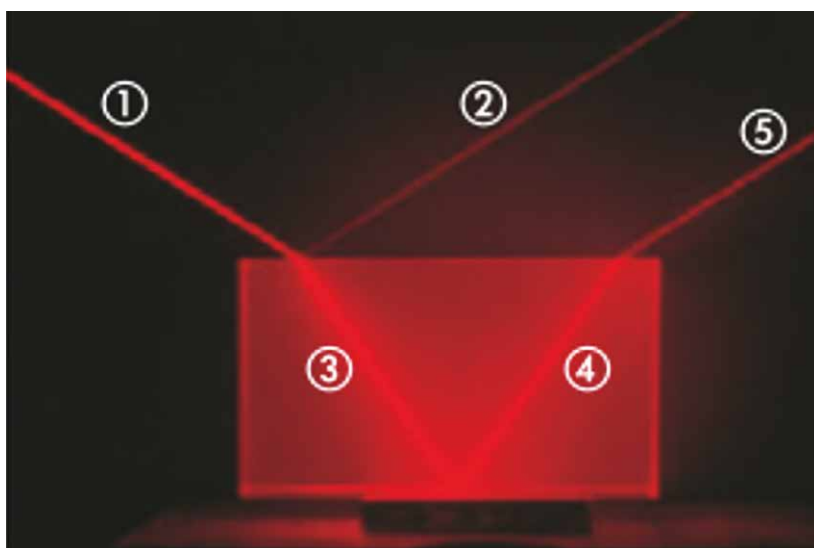


Figura 51 – A radiação incidente (1) é parcialmente refletida (2) e, consequentemente, parcialmente refratada (3) para dentro do material. Ocorre, ainda, reflexão interna no material (4), gerando um outro feixe de radiação (5), paralelo ao feixe inicialmente refletido (2)

8.2 Refração da Luz

Quando a luz passa de um meio para outro meio, ela pode sofrer um fenômeno chamado de refração. Na refração, a direção de propagação da luz se altera ao ingressar no novo meio, embora a propagação dos raios de luz continue sempre de forma retilínea. O que faz com que a direção de propagação da luz se altere de modo mais ou menos intenso é o índice de refração dos meios que ela atravessa.



Figura 52 – Exemplo de efeito da refração da luz. Ocorre a refração da luz entre a água de dentro do copo e o ar que nos cerca, fazendo com que a imagem do lápis pareça descontinua

8.2.1 Índice de refração

O índice de refração é uma propriedade do meio onde a luz se propaga: é esse índice que vai causar maior ou menor refração da luz. O índice de refração é frequentemente representado por n e é uma grandeza adimensional, ou seja, não tem uma unidade associada.

No quadro 4, apresentamos o índice de refração de alguns materiais.

Quadro 4 – Índices de refração para alguns materiais, à temperatura de 20 °C, para radiação de comprimento de onda de 589 nm no vácuo

Substância	Índice de refração (n)
Ar ($T = 0\text{ °C}$ e $P = 1\text{ atm}$)	1,000
Água	1,333
Álcool etílico	1,361
Glicerina	1,473
Poliestireno	1,49
Benzeno	1,501
Vidro <i>crown</i>	1,52
Vidro <i>flint</i>	1,66
Diamante	2,419

Adaptado de: Serway e Jewett (2013).



Saiba mais

Para saber mais sobre vidros em óptica, leia:

VIDRO crown. In: WIKIPÉDIA. [s.d.]. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Vidro_crown. Acesso em: 28 out. 2020.

FLINT glass. In: WIKIPEDIA. [s.d.]. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Flint_glass. Acesso em: 28 out. 2020.

8.2.2 Velocidade de propagação em um meio

A velocidade de propagação da luz no vácuo, representada por c , é uma constante da física e é igual a $c = 3 \cdot 10^8$ m/s.

O índice de refração n é calculado a partir da relação entre a velocidade de propagação da luz no vácuo, representada, como dissemos, por c , e a velocidade da propagação em um meio, representada por v . Equacionando, temos:

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

Exemplo de aplicação

Podemos determinar a velocidade de propagação da luz no diamante usando a equação que relaciona a velocidade de propagação da luz c com o índice de refração n do meio de propagação:

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

Substituindo a velocidade da luz c por $3 \cdot 10^8$ m/s e o índice de refração para o diamante n por 2,419, conforme mostrado no quadro 4, chegamos a:

$$2,419 = \frac{3 \cdot 10^8}{v}$$

Isolando a velocidade:

$$v = \frac{3 \cdot 10^8}{2,419}$$

$$v = 1,24 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

Vemos que a velocidade de propagação da luz no diamante é $1,24 \cdot 10^8$ m/s, ou seja, 41% da velocidade da luz no vácuo.

Vimos que, quando a luz passa de um material para outro, sua velocidade muda, mas será que outras propriedades da luz são alteradas?

Quando tratamos a luz como uma onda, analisamos outro parâmetro, o comprimento de onda, simbolizado pela letra grega λ , relacionado com o que nosso olho interpreta como cor (figura 53). A luz pode ser monocromática, quando tem apenas um comprimento de onda ou apenas uma cor, ou branca, composta por diversos comprimentos de onda.

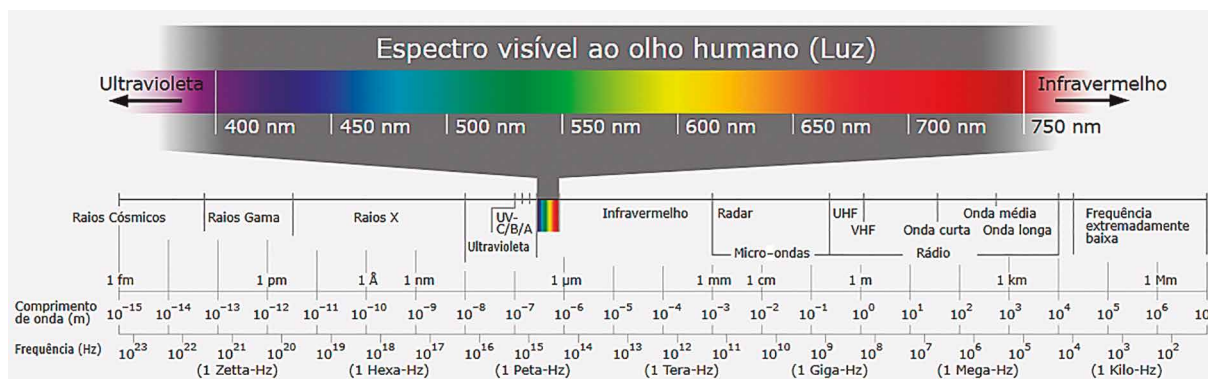


Figura 53 – Espectro da luz visível

O índice de refração pode alterar não apenas a velocidade de propagação da luz, mas também seu comprimento de onda, ou seja, sua cor. A relação entre o índice de refração n do meio e o comprimento de onda λ da radiação é dada por:

$$n = \frac{\lambda}{\lambda_n}$$

Na equação:

- λ é o comprimento de onda da luz no vácuo;
- λ_n é o comprimento de onda da luz no meio em questão.

Exemplo de aplicação

Considerando uma radiação de comprimento de onda λ igual a 589 nm no vácuo, qual será o comprimento de onda dessa radiação se ela se propagar em diamante?

Começamos com a expressão que relaciona o índice de refração n com o comprimento de onda λ :

$$n = \frac{\lambda}{\lambda_n}$$

Substituímos, na igualdade acima, o índice de refração do diamante, $n = 2,419$, conforme dado no quadro 4, e o comprimento de onda da radiação no vácuo, $\lambda = 589$ nm.

$$2,419 = \frac{589}{\lambda_n}$$

Isolando λ_n , ficamos com:

$$\lambda_n = \frac{589}{2,419}$$

$$\lambda_n = 243,5 \text{ nm}$$

Vemos que a luz com comprimento de onda de 589 nm no vácuo, quando passa a se propagar no diamante, tem seu comprimento de onda alterado para 243,5 nm, o que representa uma mudança de cor de amarela para ultravioleta, que está fora do espectro de radiação visível.



Lembrete

O prefixo "nano" equivale a 10^{-9} , como vimos no quadro 2, de forma que 243,5 nm pode ser escrito como:

$$243 \text{ nm} = 243,5 \cdot 10^{-9} \text{ m} = 2,4 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

Uma radiação de comprimento de onda igual a $2,4 \cdot 10^{-7}$ metros, conforme a figura 53, encontra-se na faixa do ultravioleta.

Como o índice de refração vai ser sempre um valor maior do que 1, a luz sempre vai ter diminuição de velocidade de propagação quando passa do vácuo para outro meio com índice de refração diferente, e o seu comprimento de onda sempre vai diminuir, ou seja, a radiação vai tender ao lado azul do espectro.

8.2.3 Lei de Snell-Descartes

Falamos que a direção de propagação da luz se altera quando ela passa de um meio para outro, com índices de refração diferentes, embora mantenha sua propagação linear em cada meio. Esse desvio é quantificado pela lei de Snell-Descartes.

Considere uma radiação cujo raio de luz se propaga com ângulo θ_1 em um meio cujo índice de refração é n_1 , que atravessa para um meio de índice de refração n_2 e passa a se propagar com ângulo θ_2 . Os ângulos são medidos em relação à normal da interface entre os dois meios.

A lei de Snell-Descartes fornece a seguinte igualdade:

$$n_1 \cdot \text{sen}(\theta_1) = n_2 \cdot \text{sen}(\theta_2)$$

Na figura 54, temos um esquema da difração da luz ao atravessar a interface de dois meios de índice de refração distintos.

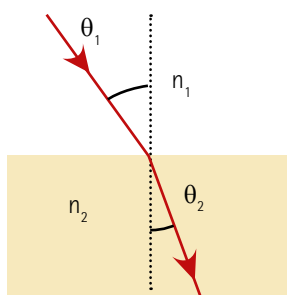


Figura 54 – Refração da luz ao atravessar de um meio para outro, com índices de refração n_1 e n_2 distintos

Temos um exemplo de refração quando a luz proveniente do céu é refratada por uma camada de ar mais quente, localizada próxima da pista de uma estrada, por exemplo. Essa luz refratada nos dá a impressão de que existe água naquele ponto da pista, mas, conforme nos aproximamos, a água misteriosamente desaparece. Esse mesmo princípio pode explicar os oásis que as pessoas perdidas em desertos acreditam ver sem que eles, de fato, existam.

Exemplo de aplicação

Considere um feixe de luz monocromática, de comprimento de onda 589 nm, que se propaga no ar. O feixe incide com ângulo de 20° em relação à normal da face de um objeto de vidro (tipo *flint*). Qual é o ângulo de refração dessa radiação no vidro?

Começamos com a lei de Snell-Descartes:

$$n_1 \cdot \text{sen}\theta_1 = n_2 \cdot \text{sen}\theta_2$$

Do quadro 4, vimos que o índice de refração para o vidro *flint* é $n_2 = 1,66$, e que o índice de refração para o ar é $n_1 = 1,000$. Substituímos, na lei de Snell-Descartes, os dados de índices de refração e do ângulo θ_1 , tomando cuidado para manter cada meio em cada lado da equação.

$$1.\text{sen}20^\circ = 1,66.\text{sen}\theta_2$$

$$1.0,342 = 1,66.\text{sen}\theta_2$$

$$\text{sen}\theta_2 = \frac{0,342}{1,66}$$

$$\text{sen}\theta_2 = 0,206$$

$$\theta_2 = \arcsen(0,206)$$

$$\theta_2 = 11,9^\circ$$

Então, uma radiação incidente com ângulo de 20° , passando do ar para o vidro *flint*, é refratada para um ângulo de $11,9^\circ$.



Observação

O seno e o cosseno são funções trigonométricas periódicas de período 2π e que retornam valores entre -1 e $+1$.

A função inversa do seno é o arco seno, simbolizada por $\arcsen(x)$ ou por $\text{asen}(x)$.

A função inversa do cosseno é o arco cosseno, simbolizada por $\arccos(x)$ ou $\text{acos}(x)$.

Tanto o arco cosseno quanto o arco seno só podem ser calculados de valores entre -1 e $+1$.

Normalmente, o arco seno pode ser calculado em calculadoras científicas usando-se a combinação das teclas Shift + Sen da calculadora, embora isso possa variar com o modelo da calculadora. O arco cosseno é calculado de maneira equivalente, com a combinação de teclas Shift + Cos.

Temos um ângulo máximo em que a radiação pode ser refratada, conhecido como ângulo limite. Nesse caso, a radiação refratada vai se propagar paralelamente à interface dos meios, com ângulo de 90° em relação à normal (figura 55).

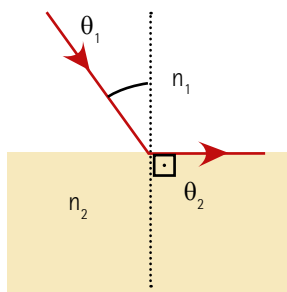


Figura 55 – Caso de ângulo limite de incidência para refração

Escrevendo a lei de Snell-Descartes para esse caso, ficamos com:

$$n_1 \cdot \text{sen}(\theta_1) = n_2 \cdot \text{sen}(\theta_2)$$

$$n_1 \cdot \text{sen}(\theta_1) = n_2 \cdot \text{sen}(90^\circ)$$

Temos que $\text{sen}(90^\circ) = 1$. Logo:

$$n_1 \cdot \text{sen}(\theta_1) = n_2$$

$$\theta_1 = \arcsen\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

Para valores de ângulos superiores ao dado por essa equação, não ocorre refração da luz, e a reflexão é total.

Essa equação traz uma informação importante. O seno é uma função que retorna valores limitados entre -1 e $+1$. Logo, só podemos calcular o arco seno de argumentos nessa faixa. Como índices de refração são sempre positivos, devemos ter:

$$0 < \frac{n_2}{n_1} < 1$$

$$n_2 < n_1$$

Logo, só teremos o caso de refração limite se a radiação passa de um meio com índice de refração maior (n_1) para outro meio com índice de refração menor (n_2).

8.2.4 Reflexão interna total

Quando a luz está em um meio cujo índice de refração é maior do que o índice de refração para o meio onde ela se dirige, podemos ter um fenômeno chamado de reflexão total. O ângulo crítico de incidência θ_c é o que faz com que o raio refletido pela interface entre os dois meios seja paralelo a essa interface. Para a luz se movendo no meio de índice de refração n_1 , temos:

$$\sin(\theta_c) = \frac{n_2}{n_1}, (n_1 > n_2)$$

Assim, há os casos a seguir:

- para valores de ângulos maiores do que θ_c , temos reflexão interna total;
- para valores de ângulos menores do que θ_c , parte do raio é refletida e parte do raio é refratada.

O conceito de reflexão interna total é o princípio de funcionamento de fibras ópticas, como veremos mais adiante.

9 DISPOSITIVOS ÓPTICOS

9.1 Dioptro plano

Dioptro plano é um sistema formado por dois meios distintos e transparentes, cuja interface entre os meios é um plano. Um exemplo de um dioptro plano pode ser visto em um reservatório de água e no ar sobre ele.

Quando a luz atinge a interface entre os meios, ela pode ser refletida e/ou refratada. Vamos considerar aqui apenas o caso de difração.

Considere um observador no meio 1 e um objeto localizado em um ponto P, à distância d entre esse ponto e a interface entre os meios (figura 56).

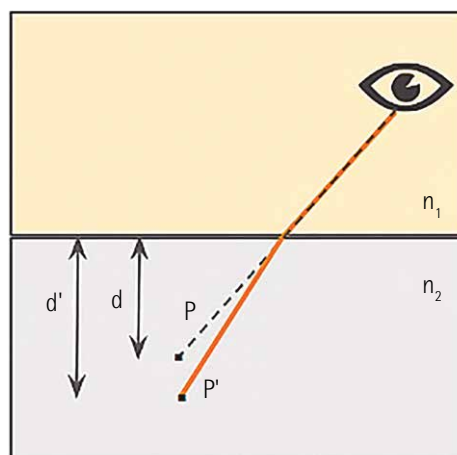


Figura 56 – Dioptro plano

Como os índices de refração n entre os meios são distintos, pode ocorrer a refração do raio de luz, o que faz com que a posição aparente P' seja distinta do ponto P . Isso ocorre porque o ponto P se encontra à profundidade d da interface entre os meios, e sua imagem P' se encontra à distância virtual d' da interface.

A relação entre os índices de refração dos meios nos diz se a imagem virtual (em P') vista pelo observador está abaixo ou acima da imagem real (em P).

Da lei de Snell-Descartes, considerando θ_1 o ângulo de incidência do raio sem refratar (linha pontilhada na figura 56) e θ_2 o ângulo de incidência do raio refratado (linha laranja na figura 56), temos:

$$n_1 \cdot \sin(\theta_1) = n_2 \cdot \sin(\theta_2)$$

$$\frac{\sin(\theta_1)}{\sin(\theta_2)} = \frac{n_2}{n_1}$$

Escrevendo essa expressão em termos das distâncias das imagens à interface entre os meios, chegamos a:

$$\frac{d}{d'} = \frac{n_2}{n_1}$$

Assim, há as situações descritas a seguir.

- Se $n_2 > n_1$, a profundidade d será maior do que a profundidade d' da imagem virtual: logo, um objeto no ponto P parecerá menos profundo.
- Se $n_2 < n_1$, a profundidade d será menor do que a profundidade d' da imagem virtual: logo, um objeto no ponto P parecerá mais profundo.

No caso de interface entre ar e água, com o observador no ar (meio 1) e um peixe na água (meio 2), como o índice de refração do ar é menor do que o da água, o peixe parecerá estar em uma posição menos profunda do que a posição em que realmente está (figura 57).

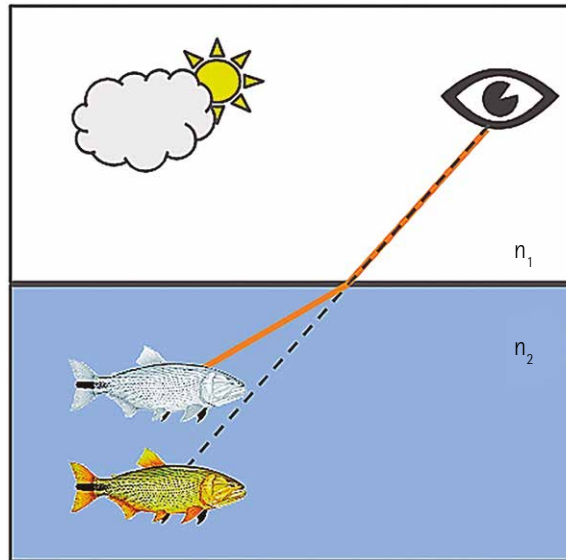


Figura 57 – Efeito da refração na imagem de um peixe por um observador fora da água

Por exemplo, uma ave caçando um peixe submerso e uma pessoa praticando pesca com lança e que não tenha estudado dióptro plano sabem, por experiência, que não devem mirar diretamente na imagem que veem do peixe, mas um pouco abaixo dessa imagem (figura 58).



Figura 58 – Pesca com arco e flecha. Para acertar o peixe, o pescador não pode mirar a flecha na imagem que ele vê do peixe

Exemplo de aplicação

Considere um lápis de 15 cm, que é colocado, na vertical, em um bloco de vidro, cujo índice de refração é 1,5. Um observador encontra-se em um meio cujo índice de refração é 1 e observa o lápis preso no bloco de vidro.

Podemos calcular o tamanho aparente do lápis para esse observador. Começamos por:

$$\frac{d}{d'} = \frac{n_2}{n_1}$$

Substituindo os dados fornecidos na igualdade acima, considerando d o tamanho real e d' o tamanho aparente, n_1 o índice de refração do meio do observador e n_2 o índice de refração do meio do objeto, ficamos com:

$$\frac{15}{d'} = \frac{1,5}{1}$$

Isolando d' , chegamos a:

$$d' = \frac{15}{1,5}$$

$$d' = 10 \text{ cm}$$

Logo, o tamanho aparente do lápis para o observador é 10 cm, ou seja, esse tamanho é $2/3$ do tamanho real do lápis.

9.2 Câmara escura de orifício

A câmara escura de orifício é outro dispositivo interessante para estudarmos a formação de imagens.

No interior da câmara escura, a imagem de um objeto é formada da seguinte maneira (figura 59):

- consideramos um raio de luz partindo da base do objeto, atravessando o orifício da câmara escura e atingindo o seu fundo;
- repetimos o mesmo procedimento com um raio de luz proveniente do topo do objeto;
- temos, então, a imagem formada no fundo da câmara, que é invertida.

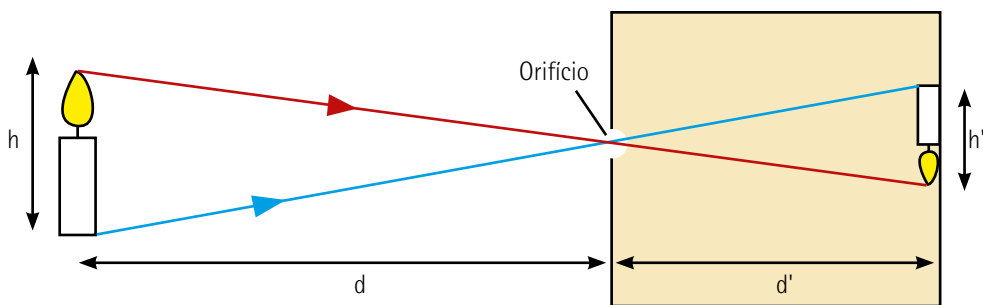


Figura 59 – Formação de imagem em uma câmara escura com orifício

Vale notar os casos explicados a seguir.

- Se as distâncias entre o objeto e o orifício e entre o orifício e o fundo da câmara escura são iguais, a imagem formada tem o mesmo tamanho do objeto (figura 60).
- Se a distância entre o objeto e o orifício é maior do que a distância entre o orifício e o fundo da câmara (figura 59), a imagem formada na câmara é menor do que o tamanho do objeto.
- Se a distância entre o objeto e o orifício é menor do que a distância entre o orifício e o fundo da câmara (figura 61), a imagem formada na câmara é maior do que o tamanho do objeto.

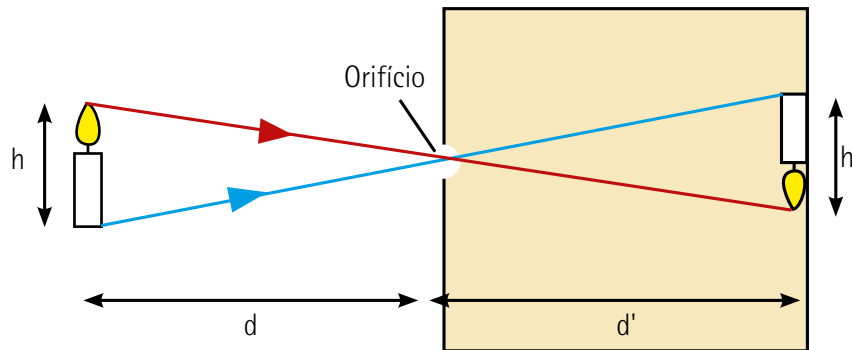


Figura 60 – Formação de imagem de mesmo tamanho que o objeto em uma câmara escura com orifício

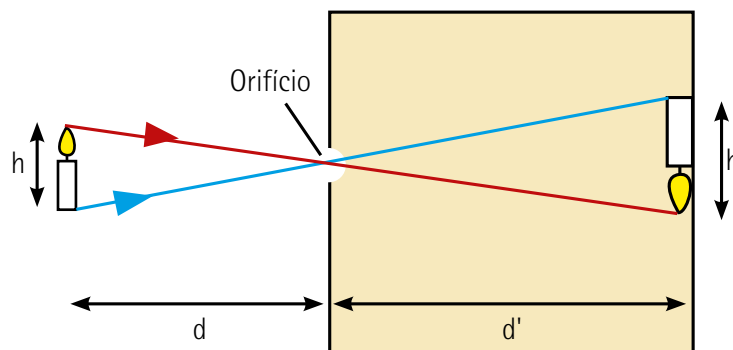


Figura 61 – Formação de imagem de tamanho maior que o objeto em uma câmara escura com orifício

Logo, podemos ampliar ou reduzir uma imagem apenas alterando a sua distância em relação ao orifício.



Saiba mais

A câmara escura de orifício pode ser aplicada em fotografia, com o que é conhecido por câmera pinhole. Nesse tipo de fotografia, utiliza-se uma lata ou uma caixa com um furo para formar a imagem sobre um filme, colocado dentro dela.

Para saber mais sobre a construção de uma câmera pinhole, veja:

TUTORIAL: como fazer uma câmera pinhole. 2015. 1 vídeo (3 min). Publicado pelo canal focaestadao. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=EOJKUCZfyfl>. Acesso em: 30 out. 2020.

Para ver algumas fotos feitas com essa técnica, visite os *sites* a seguir.

<http://www.thepinholething.com/pinhole-photography/>

<https://chriskeeney.com/pinhole/>

<https://www.stevendempseyphotography.com/portfolio-pinhole.html>

10 ONDAS

Neste item, veremos as bases físicas necessárias para compreendermos os fenômenos ondulatórios.

10.1 Definições básicas

Podemos ter tanto ondas eletromagnéticas quanto ondas mecânicas ou ondas na matéria. No entanto, há alguns parâmetros comuns nos estudos de todos os tipos de ondas, como os apresentados a seguir.

Definimos o período T como o intervalo de tempo entre duas situações iguais e sucessivas, ou seja, o período é o intervalo de tempo até que uma situação volte a se repetir. Em síntese, o período é o intervalo de tempo relativo à ocorrência de uma oscilação completa. Como estamos falando em tempo, usamos o segundo (s) como unidade para o período no sistema internacional de unidades (SI).

Definimos a frequência f como a quantidade de oscilações ocorridas por unidade de tempo. Usamos o hertz (Hz) como unidade de frequência no sistema internacional de unidades (SI).

O período e a frequência relacionam-se pela seguinte equação:

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

Outra quantidade relevante quando estudamos ondas é a amplitude A , que, no caso de oscilações harmônicas, é a distância entre a linha média e um ponto de máximo da onda ou entre a linha média e um ponto de mínimo da onda. Como a amplitude é uma distância, ela é medida em metros (m) no sistema internacional de unidades (SI).



Observação

As oscilações harmônicas seguem uma função seno ou uma função cosseno.

Exemplo de aplicação

Um exemplo de ondas aplicadas à eletricidade é o caso da tensão alternada que temos em instalações elétricas, que, no Brasil, opera com frequência de 60 Hz, ou seja, com 60 oscilações completas a cada segundo.

Podemos determinar o período da tensão da rede de fornecimento de energia por:

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

$$T = \frac{1}{60}$$

$$T = 0,017 \text{ s}$$

Então, o período da tensão na rede de energia é 0,017 s, o que significa que o sinal de tensão vai oscilar de forma a ter um máximo a cada 0,017 s (ou um mínimo nesse mesmo intervalo de tempo).

Na figura 62, indicamos o período T e a amplitude A de uma onda harmônica.

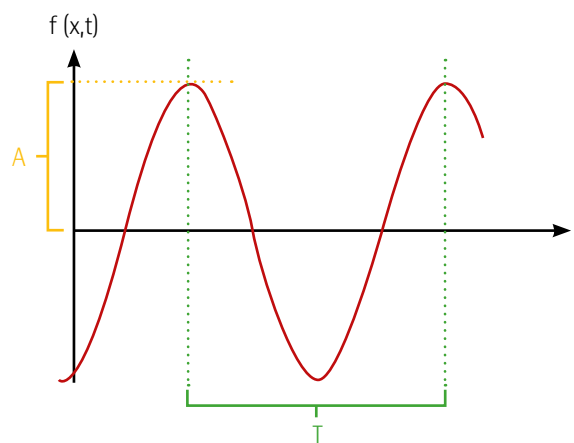


Figura 62 – Amplitude A e período T de uma onda harmônica.
Note que o eixo horizontal representa o tempo t



Observação

A amplitude de um sinal de tensão harmônica é igual à metade da tensão de pico a pico, já que a tensão de pico a pico é a diferença de tensão entre um máximo e um mínimo do sinal.

A partir do período, podemos calcular a pulsação ω de uma onda, dada por:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

Como o período é o inverso da frequência, a pulsação também é dada por:

$$\omega = 2\pi \cdot f$$

A unidade da pulsação é rad/s.



Observação

O radiano, simbolizado por rad, é uma unidade de medida de ângulo, de forma que 180 graus equivalem a π radianos. Normalmente, nessa notação, deixamos o π indicado, em vez de expressá-lo numericamente por sua aproximação de 3,14.

O número π é um número irracional, ou seja, não pode ser representado como uma fração. Logo, esse número tem "infinitas" casas depois da vírgula sem qualquer estrutura repetitiva.

Exemplo de aplicação

Sabendo que a frequência da rede de energia no Brasil é de 60 Hz, podemos calcular a pulsação da tensão fornecida por essa rede.

A pulsação é dada, em função da frequência, por:

$$\omega = 2\pi \cdot f$$

$$\omega = 2\pi \cdot 60$$

$$\omega = 120\pi \text{ rad/s}$$

$$\omega = 377,0 \text{ rad/s}$$

Então, a pulsação da rede de energia no Brasil é igual a 120π rad/s, ou, calculando numericamente, 377 rad/s. Nesse caso, aproximamos o π por 3,14.

Definimos o comprimento de onda λ como a distância entre dois máximos ou dois mínimos de uma onda, medida na direção de propagação da onda. Como estamos falando de distância, usamos o metro (m) para unidade de comprimento de onda no sistema internacional de unidades (SI).

Na figura 63, representamos o comprimento de onda.

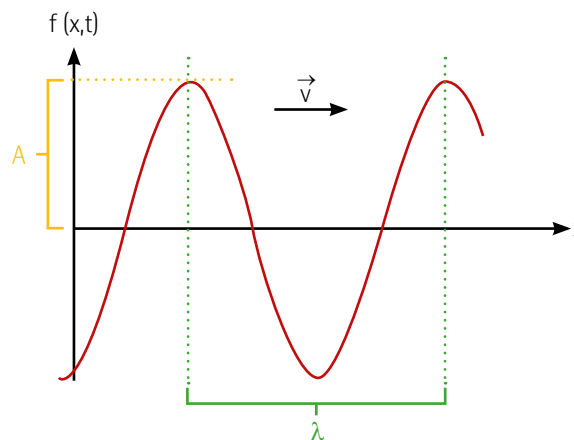


Figura 63 – Amplitude A e comprimento de onda λ . Note que o eixo horizontal representa a posição x

A partir do comprimento de onda, definimos o número de onda k , dado por:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

A velocidade v de propagação da onda pode ser obtida por:

$$v = \lambda \cdot f$$

Exemplo de aplicação

Dados o comprimento de onda e a frequência de uma onda, podemos calcular a sua velocidade de propagação.

Suponha que uma criança, ao brincar com uma corda, produza um sinal periódico com frequência de 0,5 Hz (ou seja, uma oscilação a cada 2 segundos) e com comprimento de onda de 1 metro. A velocidade de propagação da onda nessa corda é:

$$v = \lambda \cdot f$$

$$v = 1 \cdot 0,5$$

$$v = 0,5 \text{ m/s}$$

Logo, a onda se propaga com velocidade de 0,5 m/s.

Com as quantidades estudadas, podemos representar matematicamente a equação de uma onda:

$$y(x,t) = A \cdot \cos(k \cdot x - \omega \cdot t + \delta)$$

Na equação:

- $y(x,t)$ é a posição da onda, na direção do eixo y , em função da posição x e do tempo t ;
- A é a amplitude;
- k é o número de onda;
- ω é a pulsação;
- δ é a fase inicial.

As ondas mecânicas podem ser classificadas em ondas progressivas ou em ondas regressivas, de acordo com o sentido de propagação.

As ondas progressivas, que se propagam na direção do eixo de posição, são dadas por:

$$y(x,t) = A \cdot \cos(k \cdot x - \omega \cdot t + \delta)$$

As ondas regressivas, que se propagam na direção oposta à do eixo de posição, são dadas por:

$$y(x,t) = A \cdot \cos(k \cdot x + \omega \cdot t + \delta)$$

Na figura 64, temos as representações de uma onda progressiva e de uma onda regressiva.

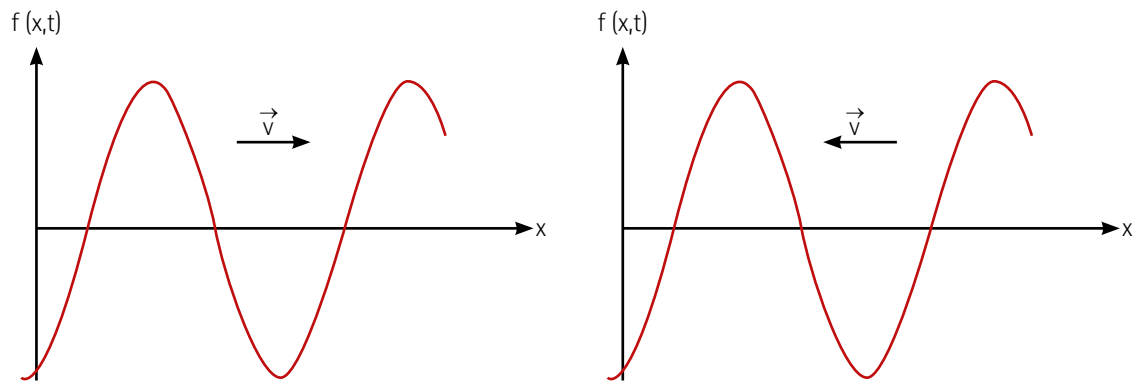


Figura 64– Onda progressiva (esquerda) e onda regressiva (direita)

10.2 Ondas eletromagnéticas

Ondas eletromagnéticas são ondas compostas pela combinação de uma onda de campo elétrico e de uma onda de campo magnético, em planos perpendiculares e em fase. Ondas eletromagnéticas propagam-se com a velocidade da luz, representada por c e igual a $3 \cdot 10^8$ m/s no vácuo.

As amplitudes do campo elétrico E e do campo magnético B , em uma onda eletromagnética, são dadas, respectivamente, por:

$$E = E_m \cdot \cos(k \cdot x - \omega \cdot t)$$

$$B = B_m \cdot \cos(k \cdot x - \omega \cdot t)$$

Nas igualdades, E_m e B_m são as amplitudes do campo elétrico e do campo magnético, respectivamente. Note que, como as ondas estão em fase, o argumento do cosseno deve ser o mesmo nas duas ondas.

As amplitudes do campo elétrico e do campo magnético relacionam-se por:

$$E_m = \frac{B_m}{c}$$

Na figura 65, são representados o campo elétrico \vec{E} e o campo magnético \vec{B} em uma onda eletromagnética.

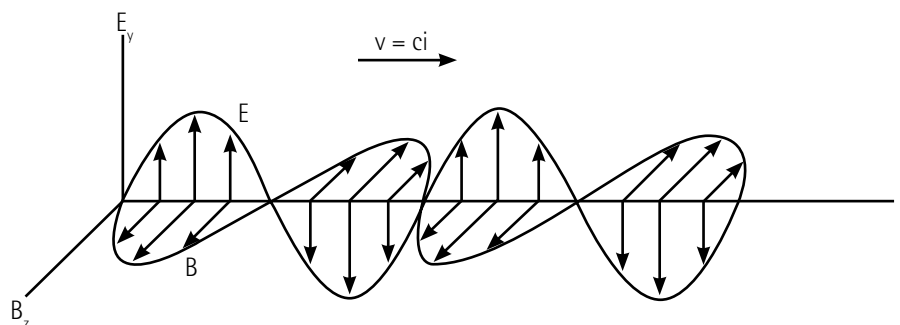


Figura 65 – Onda eletromagnética composta por campos elétrico e magnético, perpendiculares e em fase



Saiba mais

Para ver uma animação de uma onda eletromagnética mostrando a variação dos campos elétrico e magnético, visite o *site* a seguir.

ONDAS EM: animação. [s.d.]. Disponível em: http://www.rc.unesp.br/showdefisica/99_Explor_Eletrizacao/paginas%20htmls/Ondas%20EM%20anima%C3%A7%C3%A3o.htm. Acesso em: 4 nov. 2020.

A direção e o sentido de propagação da onda eletromagnética são os mesmos do produto vetorial do vetor campo elétrico pelo vetor campo magnético, ou seja, de $\vec{E} \times \vec{B}$.

Exemplo de aplicação

Considere uma onda eletromagnética cujos campos elétrico e magnético são dados a seguir.

$$\vec{E} = E_m \cdot \cos(k \cdot x - \omega \cdot t) \vec{i}$$

$$\vec{B} = B_m \cdot \cos(k \cdot x - \omega \cdot t) \vec{j}$$

A direção e o sentido da propagação da onda eletromagnética produzida pelo acoplamento desses dois campos são dados pelo produto vetorial $\vec{E} \times \vec{B}$, ou seja, pelo produto vetorial entre os versores $\vec{i} \times \vec{j}$ (figura 66).

Da regra da mão direita, temos que:

$$\vec{i} \times \vec{j} = \vec{k}$$

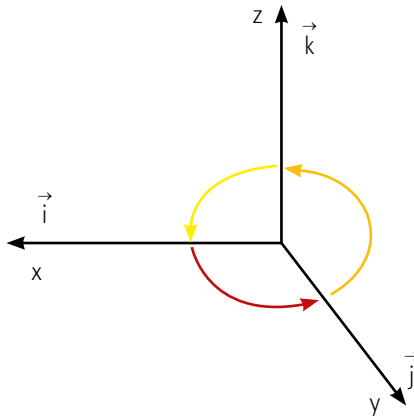


Figura 66 – Aplicação da regra da mão direita: vemos que o produto vetorial $\vec{i} \times \vec{j}$ tem como resultado o versor \vec{k} (acompanhe o trajeto da seta vermelha com os dedos indicador, médio, anular e mínimo, em concha, e o polegar apontará na direção do versor \vec{k})

Logo, a onda eletromagnética propaga-se na direção e no sentido de \vec{k} , ou seja, na direção do eixo z e no sentido de z positivo.

11 COERÊNCIA E INTERFERÊNCIA

A seguir, exploraremos os conceitos de coerência e interferência de ondas.

11.1 Superposição de ondas

O princípio da superposição diz que, se temos duas ou mais ondas em um meio, a onda resultante será dada pela soma das equações das ondas individuais. Se uma onda satisfaz a esse princípio, ela é dita onda linear.

Sejam duas ondas senoidais, de mesma amplitude, mesma pulsação e mesmo número de onda, dadas pelas equações y_1 e y_2 a seguir.

$$y_1 = A \cdot \cos(k \cdot x - \omega \cdot t)$$

$$y_2 = A \cdot \cos(k \cdot x - \omega \cdot t + \delta)$$

A onda resultante é calculada, pelo princípio da superposição, por:

$$Y = y_1 + y_2$$

$$y = A \cdot [\cos(k \cdot x - \omega \cdot t) + \cos(k \cdot x - \omega \cdot t + \delta)]$$

$$y = 2A \cdot \cos\left(\frac{\delta}{2}\right) \cdot \cos\left(k \cdot x - \omega \cdot t + \frac{\delta}{2}\right)$$



Observação

Na equação anterior, fizemos uso da seguinte relação trigonométrica:

$$\cos(a) + \cos(b) = 2 \cdot \left[\cos\left(\frac{a+b}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{a-b}{2}\right) \right]$$

No caso em estudo, temos:

$$a = k \cdot x - \omega \cdot t$$

$$b = k \cdot x - \omega \cdot t + \delta$$

A onda resultante tem a seguinte característica: a sua amplitude é dada por $2 \cdot A \cdot \cos(\delta/2)$. Essa diferença de fase nos leva a dois tipos de interferência de onda: interferência construtiva e interferência destrutiva.

Exemplo de aplicação

Considere duas ondas de mesma amplitude propagando-se em uma corda. Qual diferença de fase entre essas ondas produzirá a maior e a menor amplitude na onda resultante?

Vimos que a onda resultante da superposição de duas ondas idênticas, de amplitude A , número de onda k e pulsação ω , com diferença de fase δ entre elas, é dada por:

$$y = 2A \cdot \cos\left(\frac{\delta}{2}\right) \cdot \cos\left(k \cdot x - \omega \cdot t + \frac{\delta}{2}\right)$$

A amplitude da onda sempre multiplica o termo dependente do tempo, tanto se esse termo for calculado como um cosseno quanto se ele for calculado como um seno.

Logo, a amplitude de uma onda resultante da superposição de duas ondas é:

$$A_{\text{sup}} = 2 \cdot A \cdot \cos\left(\frac{\delta}{2}\right)$$

Temos um cosseno na expressão anterior, mas o argumento dele não depende do tempo. Concluimos que esse cosseno é um valor numérico constante no tempo.

A amplitude A_{sup} será máxima quando o módulo do cosseno for máximo e será mínima quando o módulo do cosseno for mínimo (lembrando que não há sentido em falarmos de amplitudes negativas).

Esboçando o gráfico da função $y = \cos(x)$, vemos que, em módulo, o maior valor da função cosseno é 1, e, em módulo, o menor valor é zero.

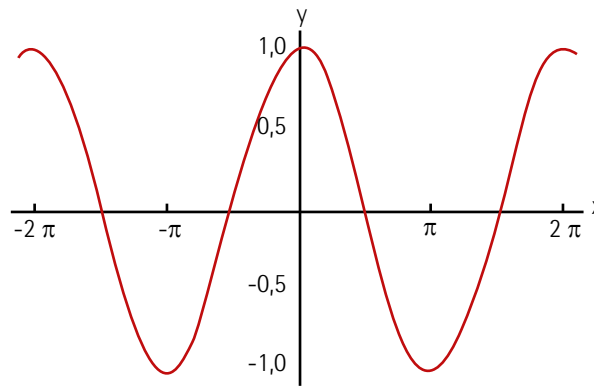


Figura 67 – Gráfico de $y = \cos(x)$

Então, a amplitude da onda resultante será maximizada quando:

$$\cos\left(\frac{\delta}{2}\right) = 1$$

$$\frac{\delta}{2} = \arccos(1)$$

$$\frac{\delta}{2} = 0$$

$$\delta = 0$$

Ou seja, temos amplitude máxima quando as ondas superpostas estão em fase. A amplitude, nesse caso, é igual a:

$$A_{\text{sup}} = 2 \cdot A \cdot \cos\left(\frac{\delta}{2}\right)$$

$$A_{\text{sup}} = 2 \cdot A \cdot \cos\left(\frac{0}{2}\right)$$

$$A_{\text{sup}} = 2 \cdot A$$

A amplitude é, portanto, o dobro da amplitude de cada onda superposta, no caso em que as ondas estão em fase.

A amplitude da onda resultante será mínima quando:

$$\cos\left(\frac{\delta}{2}\right) = 0$$

$$\frac{\delta}{2} = \arccos(0)$$

$$\frac{\delta}{2} = \arccos\left(\frac{\pi}{2}\right)$$

$$\delta = \pi$$

Ou seja, temos amplitude mínima (em módulo) quando as ondas superpostas estão com uma diferença de fase de π . A amplitude, nesse caso, é igual a:

$$A_{\text{sup}} = 2 \cdot A \cdot \cos\left(\frac{\delta}{2}\right)$$

$$A_{\text{sup}} = 2 \cdot A \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2}\right)$$

$$A_{\text{sup}} = 2 \cdot A \cdot 0 = 0$$

A amplitude é, portanto, igual a zero, e não temos mais sinal na onda.

Os comportamentos aqui estudados serão explorados mais adiante, quando falarmos de interferência de ondas.

11.2 Coerência

Dizemos que duas ondas são coerentes se existe correlação entre suas fases. Quando as fases das ondas são idênticas, dizemos que as ondas estão em fase.



Lembrete

Chamamos de fase o argumento da função trigonométrica da equação horária de uma onda.

Considere a seguinte equação de onda:

$$y(x, t) = A \cdot \cos(k \cdot x - \omega \cdot t + \phi)$$

Nesse caso, a fase é $k \cdot x - \omega \cdot t + \phi$. A quantidade representada por ϕ na equação é a fase inicial.

Como exemplo de coerência, podemos imaginar duas crianças usando boias em uma piscina. Quando uma terceira criança mergulha, ela provoca ondulações na superfície da piscina, o que faz com que as boias oscilem. Se as boias oscilam de modo que as oscilações se dão da mesma forma para as duas boias, dizemos que estão em fase. Senão, como a perturbação foi a mesma para as duas boias, a oscilação de uma está relacionada com a oscilação da outra, e temos um movimento coerente entre elas. Caso tivéssemos diversas crianças pulando em instantes aleatórios na piscina, o movimento das boias seria não coerente.

O princípio de coerência aplica-se, da mesma forma, para ondas mecânicas e para ondas eletromagnéticas. Um exemplo de uma fonte de luz não coerente é a lâmpada incandescente, na qual as diferentes partes do filamento produzem radiações com fases independentes. Um exemplo de radiação coerente é o *laser*.

A coerência pode ser de dois tipos:

- coerência espacial;
- coerência temporal.

Na coerência temporal, deve haver correlação de fase em diferentes pontos na direção de propagação da onda. No caso de radiação eletromagnética, uma fonte com alta coerência temporal é uma fonte monocromática, ou seja, que emite radiação em um único comprimento de onda.

Na coerência espacial, deve haver correlação de fase em diferentes pontos na direção perpendicular à direção de propagação, ou seja, ao longo da frente de onda. Se há coerência espacial, a fase da frente de onda é uniforme.

Podemos conseguir radiação coerente a partir de uma fonte não coerente tomando apenas uma parte da radiação, obtendo uma radiação espacialmente coerente e, em seguida, tomando apenas um intervalo de comprimento de onda, obtendo uma radiação também temporalmente coerente. Esse processo é esquematizado na figura 68.

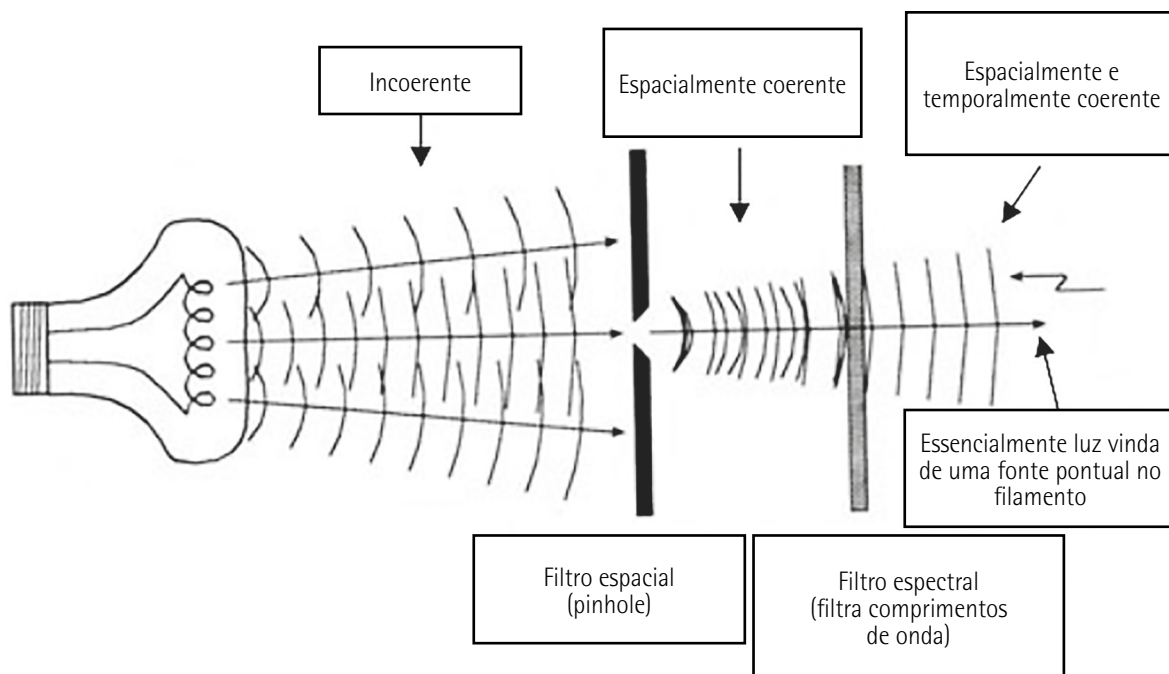


Figura 68 – Procedimento para se obter radiação espacialmente e temporalmente coerentes a partir de uma fonte não coerente, representada pela lâmpada incandescente à esquerda. O filtro espacial permite a passagem de uma pequena parte da frente de onda da radiação incoerente, enquanto o filtro espectral permite a passagem de uma faixa estreita de comprimento de onda

11.3 Interferência

Temos o caso de interferência construtiva quando a diferença de fase entre as ondas incidentes é zero, ou seja, quando elas estão em fase. Nesse caso, a amplitude A_r da onda resultante é o dobro da amplitude das ondas incidentes, pois:

$$A_r = 2.A.\cos\left(\frac{\phi}{2}\right)$$

$$A_r = 2.A.\cos\left(\frac{0}{2}\right)$$

$$A_r = 2 . A$$

Quando a diferença de fase entre as ondas é igual a π , o máximo de uma onda coincide com o mínimo da outra, de forma que a onda se aniquila. Nesse caso, temos o que chamamos de interferência destrutiva. Analisando a amplitude para tal situação, vemos que a amplitude é nula, como calculado a seguir.

$$A_r = 2.A.\cos\left(\frac{\phi}{2}\right)$$

$$A_r = 2.A.\cos\left(\frac{\pi}{2}\right)$$

$$A_r = 2.A.04$$

$$A_r = 0$$

Na figura 69, são esquematizados os processos de interferência construtiva e de interferência destrutiva.

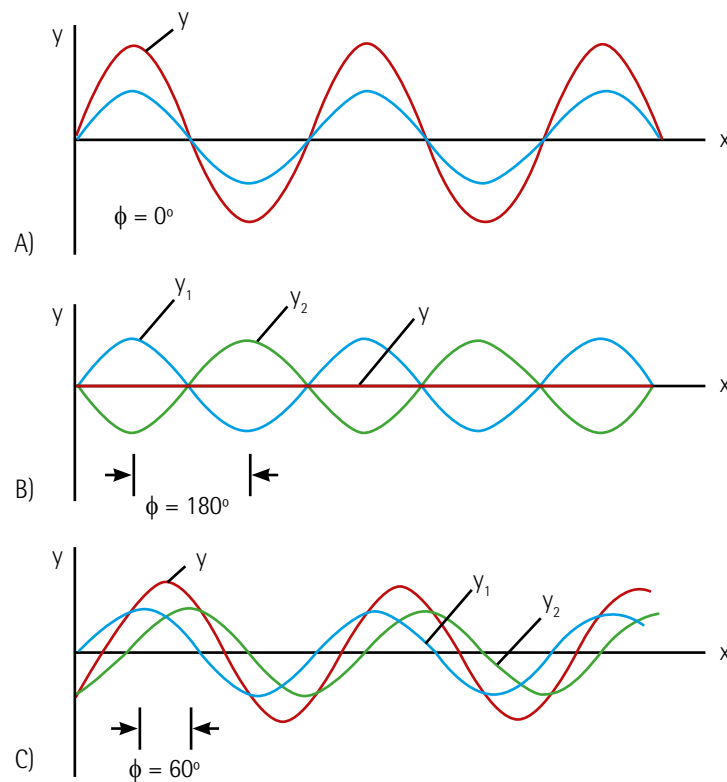


Figura 69 – Interferência construtiva (A) para ondas em fase, destrutiva (B) para ondas com diferença de fase de ϕ igual a 180° e situação intermediária (C), com diferença de fase de ϕ igual a 60°



Saiba mais

Na animação a seguir, é apresentado o padrão de interferência formado por ondas geradas por duas fontes, em uma superfície.

WAVE interference. 2007. 1 vídeo (24 seg). Publicado pelo canal Animations for Physics and Astronomy. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=PCYv0_qPk-4. Acesso em: 6 nov. 2020.

Quando temos duas ondas que se propagam em direções opostas, com mesma amplitude e mesma frequência e no mesmo fio, podemos, em certas condições, ter o que chamamos de ondas estacionárias. Nas ondas estacionárias, a amplitude de oscilação em cada ponto do fio é constante, e visualizamos um comportamento com ventres e nós. Conforme a frequência, a tensão a que o fio é submetido e o material do fio, podemos ter mais ou menos modos de vibração no fio (figura 70).

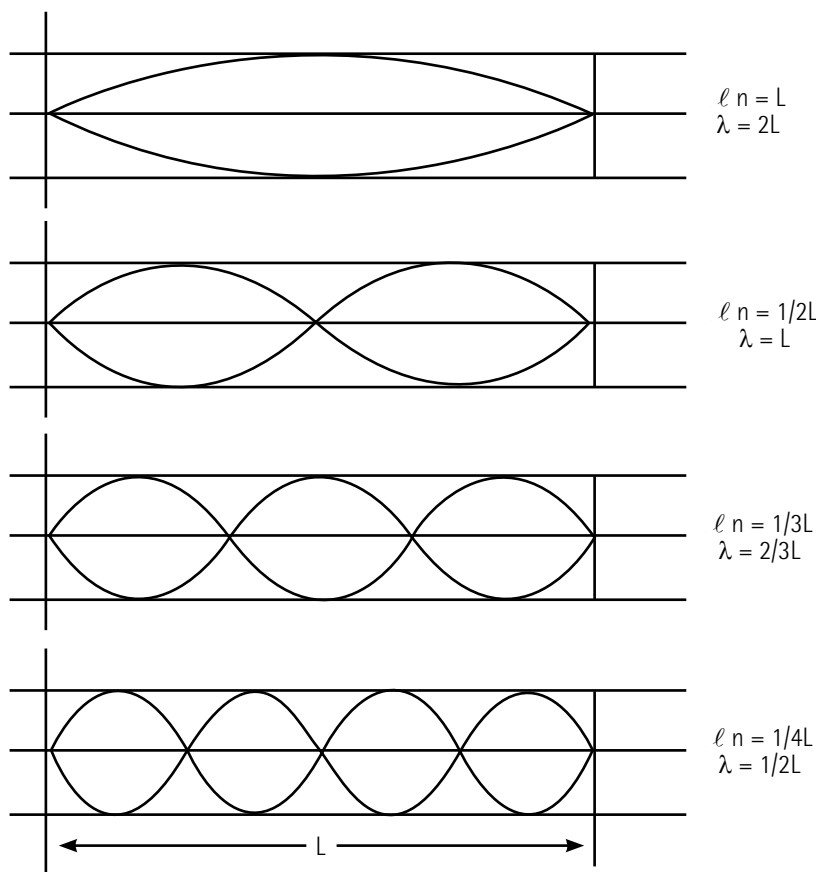


Figura 70 – Modos harmônicos em uma corda presa em suas duas extremidades. Temos, de cima para baixo, o primeiro, o segundo, o terceiro e o quarto harmônicos



Saiba mais

Para ver um vídeo com o comportamento de ondas estacionárias, visite o *site* a seguir.

ONDA estacionária (em cordas). 2017. 1 vídeo (3 min). Publicado pelo canal Azeheb Laboratórios Educacionais. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=jplFqvqW6V8>. Acesso em: 4 nov. 2020.

12 PROPAGAÇÃO EM FIBRAS ÓPTICAS

12.1 Princípios de propagação em fibras

Fibras ópticas são meios para transmissão de informação por sinais luminosos. Na figura 71, temos um objeto de decoração feito com fibras ópticas.

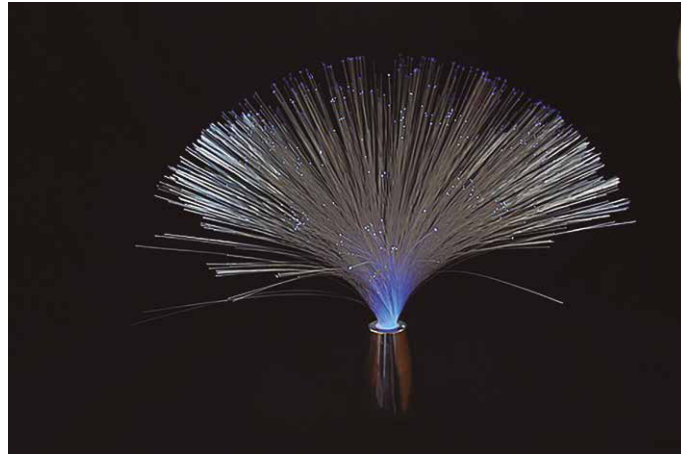


Figura 71 – Objeto de decoração feito com fibras ópticas

As fibras ópticas são compostas, basicamente, por um núcleo de material vítreo ou plástico, circundado por um material de índice de refração menor que o do núcleo, chamado de revestimento ou de casca, que, por sua vez, é envolvido por uma capa com o intuito de proteger a estrutura da fibra (figura 72).

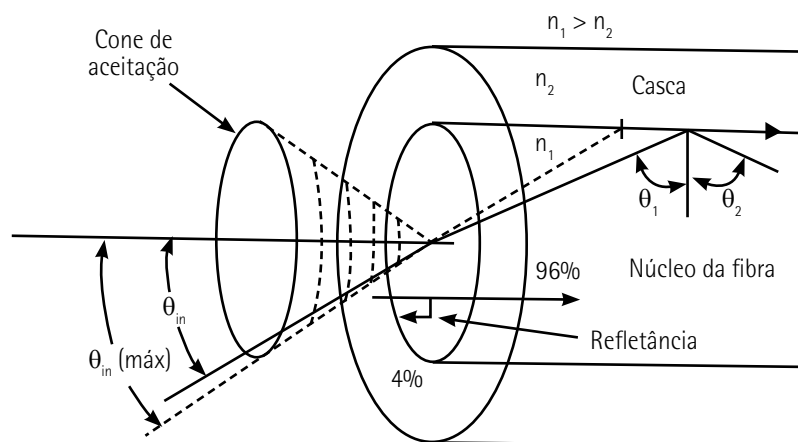


Figura 72 – Estrutura de uma fibra óptica. A luz que incide dentro do cone de aceitação é transmitida pela fibra

É importante que o revestimento que circunda o núcleo tenha índice de refração menor do que o índice de refração do núcleo, para que a radiação no núcleo sofra sucessivos processos de reflexão interna total entre essas duas estruturas, permitindo o tráfego de luz dentro da fibra.



Lembrete

O processo de reflexão interna total se dá quando o meio onde a radiação está tem índice de refração n_1 maior do que o índice de refração do meio para onde ela se dirige (n_2), e o ângulo de incidência, em relação à normal, é maior do que o ângulo crítico dado por:

$$\text{sen}(\theta_c) = \frac{n_2}{n_1}, (n_1 > n_2)$$

O núcleo das fibras ópticas é geralmente de vidro, com índice de refração $n_1 = 1,5$, com revestimento de vidro ou plástico com índice de refração $n_2 = 1,485$, o que resulta em um ângulo crítico de $81,9^\circ$.

Como o tráfego de informação se dá por reflexões internas, não temos perda de sinal nessas reflexões, mas apenas por reflexões causadas nas extremidades da fibra ou por absorção interna do próprio material do núcleo da fibra. Por isso, quanto menos emendas tivermos em fibras ópticas, melhor será a eficiência na transmissão de informação.

As reflexões nas extremidades da fibra podem ser quantificadas pela refletância entre o material da fibra e o ar, e fornecem a porcentagem da radiação incidente que é refletida pela interface vidro-ar da ponta da fibra. A refletância é dada por:

$$\text{refl} = \left(\frac{n_1 - n_a}{n_1 + n_a} \right)^2$$

Na equação:

- n_1 é o índice de refração do material do núcleo da fibra;
- $n_a = 1$ é o índice de refração do ar.

Exemplo de aplicação

Podemos calcular a refletância da extremidade da fibra, por onde o sinal luminoso é injetado. Considerando que a luz parte do ar ($n_a = 1$) para o núcleo da fibra constituído de vidro ($n_1 = 1,5$), temos:

$$\text{refl} = \left(\frac{n_1 - n_a}{n_1 + n_a} \right)^2$$

$$r_{\text{refl}} = \left(\frac{1,5 - 1}{1,5 + 1} \right)^2$$

$$r_{\text{refl}} = \left(\frac{0,5}{2,5} \right)^2$$

$$r_{\text{refl}} = (0,2)^2$$

$$r_{\text{refl}} = 0,04$$

Esse valor é usualmente representado na forma de uma porcentagem. Então, multiplicando o resultado anterior por 100%, chegamos a:

$$r_{\text{refl}} = 4\%$$

No caso do vidro, com $n_1 = 1,5$, temos refletância de 4%, ou seja, 96% da radiação incidente será transmitida pela fibra.

Outra quantidade usada para avaliar o desempenho de fibras ópticas é a abertura numérica, representada por NA, que é o máximo ângulo de aceitação na entrada de luz, para que essa luz possa ser refletida dentro da fibra. Essa quantidade é dada por:

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

Na igualdade:

- n_1 é o índice de refração do material do núcleo da fibra;
- n_2 é o índice de refração do material do revestimento da fibra.

Exemplo de aplicação

Considere a fibra óptica 3M Silica/Silica FG-200-UAT, cujo núcleo é composto por sílica de índice de refração 1,457, e o revestimento, por sílica de índice de refração 1,448 (KUANG; CANTWELL, 2003).

Podemos calcular a abertura numérica (NA) para essa fibra da seguinte forma:

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

$$NA = \sqrt{1,457^2 - 1,448^2}$$

$$NA = \sqrt{2,1228 - 2,0967}$$

$$NA = \sqrt{0,2614}$$

$$NA = 0,16$$

Logo, o máximo ângulo de aceitação de incidência de radiação, para essa fibra, em relação à normal da face da fibra, é 0,16 radianos, ou 9,3°.



Observação

Temos que 180° equivalem a π radianos. Logo, para convertermos um valor dado em graus para seu equivalente em radianos, basta dividirmos esse valor por 180 e multiplicarmos por π , de forma que:

$$0,16 \text{ rad.} \left(\frac{180^\circ}{\pi \text{ rad}} \right) = 9,3^\circ$$

Um enlace é a menor estrutura de uma rede de dados que permite a transmissão e a recepção de sinal.

O enlace de comunicação usando fibras ópticas (figura 73) é composto por um transmissor, uma fibra e um receptor. Quando a transmissão de dados se dá em distâncias curtas, como em uma rede local de computadores, o transmissor pode usar um LED para gerar o sinal luminoso na fibra (YOUNG, 2006). Quando é necessário transmitir informações a longas distâncias, são empregados *lasers* como fonte de sinal (YOUNG, 2006). Os receptores de sinal são geralmente fotodiodos.

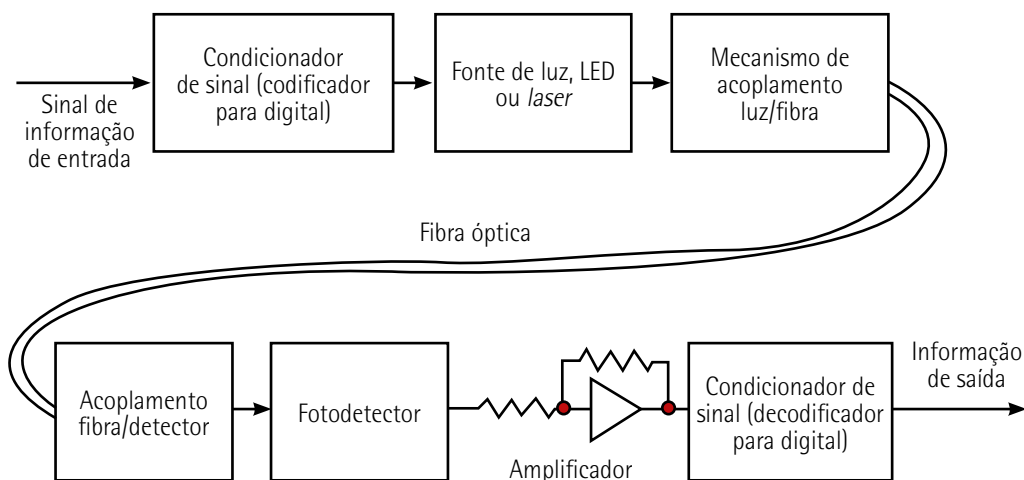


Figura 73 – Enlace de fibras ópticas

As fibras podem ser combinadas em pacotes de cabamentos, como o ilustrado na figura 74, da Western Electric, composto por 12 fitas, em que cada fita é composta por 12 fibras ópticas. Esse cabo tem

uma guia de emenda para tornar possível emenda em cabos quando é necessário transmitir informação por distâncias maiores.

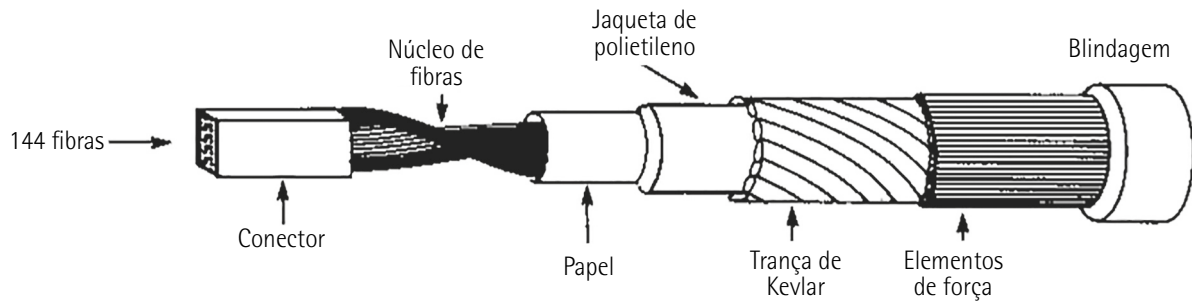


Figura 74 – Cabo de fibra da Western Electric

12.2 Tipos de fibras

Os principais tipos de fibra óptica são as fibras monomodo (SM – *single mode*) e multimodo (MM – *multimode*).

As fibras monomodo (figura 75) têm núcleo menor quando comparado com o seu revestimento, com 8 a 10 μm de diâmetro. O núcleo fino faz com que a radiação seja refletida de forma praticamente linear. Isso garante melhor qualidade de sinal, menos interferência e menor perda na transmissão, o que permite seu emprego em distâncias elevadas. É um cabeamento estruturado com alcance máximo de 4 km. Nas fibras monomodo, a radiação pode ter comprimento de onda de 1310 nm ou 1550 nm.

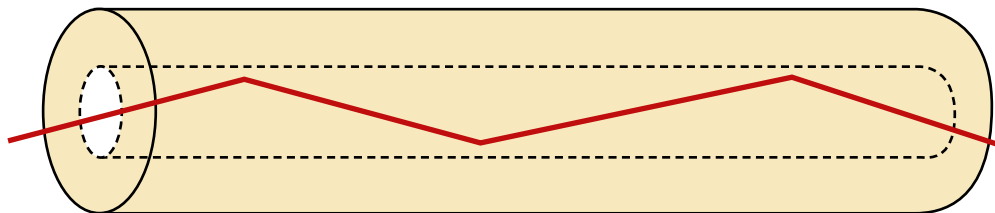


Figura 75 – Propagação de luz em uma fibra monomodo

As fibras multimodo têm núcleo maior quando comparadas às fibras monomodo, com cerca de 62,6 μm de diâmetro. O núcleo com maior diâmetro faz com que a transmissão não se dê de forma tão linear como nas fibras monomodo, fazendo com que o trajeto da luz seja maior para a transmissão do sinal. As vantagens das fibras multimodo são o custo mais baixo e a menor dificuldade técnica na realização de emendas. No entanto, vale notar que há perda de sinal mais significativa que nas fibras monomodo, fazendo com que esse tipo de fibra seja empregado na transmissão de sinais a curtas distâncias, geralmente inferiores a 2 km.

As fibras multimodo ainda podem ser classificadas em fibras multimodo de índice degrau – *step index fibers* (SI) – e em fibras multimodo graduadas – *graded index fibers* (GI).

Nas fibras multimodo *step index*, o índice de refração do núcleo da fibra é uniforme. A luz percorre a fibra com um trajeto em ziguezague, realizando reflexões internas totais na interface entre o núcleo e seu envoltório (figura 76). O diâmetro do núcleo nesse tipo de fibra é de cerca de 50 μm .

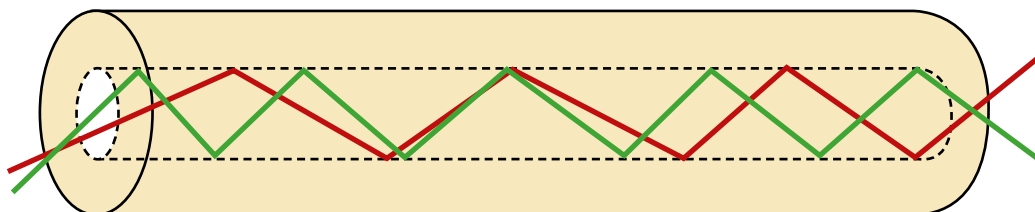


Figura 76 – Fibra multimodo *step index*. Note que o núcleo tem um diâmetro maior em relação ao revestimento da fibra monomodo

Nas fibras multimodo *graded index*, o índice de refração não é uniforme, sendo maior na parte central do núcleo da fibra e decrescendo na direção da interface com a envoltória. Essa característica faz com que a luz não percorra mais trajetórias retilíneas, senão trajetórias curvas (figura 77). O diâmetro do núcleo nesse tipo de fibra é de 50 μm a 200 μm .

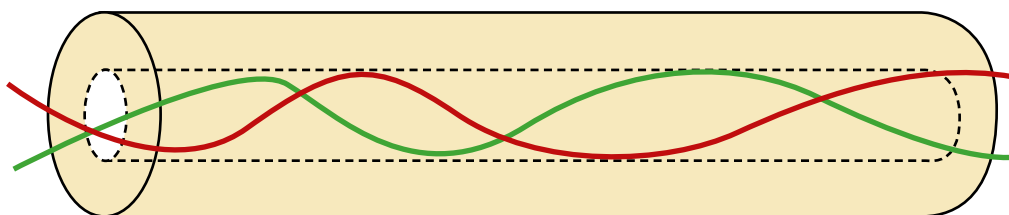


Figura 77 – Fibra multimodo *graded index*

Quanto ao uso, as fibras multimodo *step index* são usadas em transmissões de larguras de banda menores do que as larguras referentes às fibras multimodo *graded index*. Quanto à distância, as fibras multimodo *step index* são usadas para distâncias de transmissão baixas (da ordem de quilômetros) e velocidades baixas (8 Mb/s ou menos [FS COMMUNITY, 2020]), enquanto as fibras multimodo *graded index* são usadas para transmissões à média distância (de 10 a 20 km) e para velocidades elevadas de transmissão (34-140 Mb/s [FS COMMUNITY, 2020]). A *performance* das fibras multimodo *graded index* é melhor do que a *performance* das *step index*, mas seu custo é maior.

Segundo a norma TIA-598-C, os cabos de fibra óptica monomodo têm capa amarela, e os cabos multimodo têm capa azul. No Brasil, a norma ABNT NBR 14566 define as cores para identificação da fibra e das unidades básicas de cada cabo, conforme os quadros 5 e 6. A correta identificação das fibras é fundamental no processo de soldagem de dois cabos de fibra óptica.

Quadro 5 – Código de cores para identificação da fibra

Fibra	Cor
1	Verde
2	Amarela
3	Branca
4	Azul
5	Vermelha
6	Violeta
7	Marrom
8	Rosa
9	Preta
10	Cinza
11	Laranja
12	Azul-claro

Fonte: Furukawa Electric ([s.d.] *apud* ABNT, 2020).

Quadro 6 – Código de cor para identificação das unidades básicas (tubos de fibras)

Unidade básica	Cor	Unidade básica	Cor
1	Verde	13	Verde*
2	Amarela	14	Amarela*
3	Branca	15	Branca*
4	Azul	16	Azul*
5	Vermelha	17	Vermelha*
6	Violeta	18	Violeta*
7	Marrom	19	Marrom*
8	Rosa	20	Rosa*
9	Preta	21	Preta*
10	Cinza	22	Cinza*
11	Laranja	23	Laranja*
12	Azul-claro	24	Azul-claro*

* Com traços de cor negra espaçados para diferenciar dos tubos 1 a 12.

Fonte: Furukawa Electric ([s.d.] *apud* ABNT, 2020).

12.3 Vantagens e desvantagens no uso de fibras

As fibras ópticas usam luz para transmitir informação: logo, não são afetadas por interferência eletromagnética, como poderia ocorrer em cabos transmitindo sinais elétricos. As fibras ópticas também não são afetadas por fenômenos atmosféricos, por exemplo raios.

A estrutura da fibra, composta por vidro ou plástico, faz com que seu material não seja afetado por reagentes nem por corrosão, como ocorreria com cabos metálicos. Assim, fibras ópticas podem ser empregadas em locais onde se manipulam reagentes químicos ou solventes. A fibra pode ainda ser usada em locais onde há materiais inflamáveis, já que um eventual rompimento da fibra não produz faísca.

A velocidade de propagação da informação é maior nas fibras ópticas do que em cabos elétricos. Fibras ópticas ocupam menos espaço e são mais leves do que cabos condutores de cobre, o que facilita seu transporte e sua instalação por dutos. Fibras ópticas têm vida útil mais longa que fios de cobre, além de gastar menos energia que a transmissão de informação por sinais elétricos.

A estrutura de transmissão de dados por fibra óptica é elástica, ou seja, sua expansão é de fácil execução, sendo possível conectar diversos *links* em uma mesma infraestrutura.

Entre as desvantagens das fibras ópticas, temos o seu custo ainda elevado e o fato de serem mais frágeis do que os fios de cobre. Outra desvantagem aparece quando é necessária a transmissão de informação por fibra a longas distâncias, o que torna necessário o uso de amplificadores de sinal.



Saiba mais

Para saber mais sobre comunicação por fibra óptica, principalmente sobre a infraestrutura e sobre os dispositivos eletrônicos envolvidos em um enlace de comunicação por fibras ópticas, consulte:

YOUNG, P. H. *Técnicas de comunicação eletrônica*. 5. ed. São Paulo: Pearson Education, 2006. cap. 18.



Resumo

Nesta unidade, vimos o olho como instrumento óptico, detalhamos as anatomias interna e externa do olho, explicamos o processo de captação de imagens, conceituamos acuidade visual e descrevemos as alterações na visão.

Também estudamos o conceito de capacidade de resolução e o padrão de difração de Fraunhofer para abertura circular e o critério de Rayleigh para resolução de duas fontes pontuais adjacentes.

Em seguida, exploramos os princípios da óptica geométrica. São três as leis da óptica geométrica:

- lei da propagação retilínea;

- lei da reflexão;
- lei da refração.

A lei da propagação retilínea diz que a luz se propaga em trajetória retilínea em um meio: então, podemos usar raios de luz lineares para estudar os fenômenos ópticos.

A lei da reflexão diz que, quando a luz atinge a interface entre dois meios, ela é parcialmente refletida. A lei da reflexão é usada no estudo de espelhos planos e de formação de imagens por eles. Estudamos, ainda, o campo visual de um espelho plano.

Na sequência, abordamos os conceitos de refração, que é o desvio de um raio de luz ao atravessar a interface entre dois meios distintos, e de índice de refração, que é o parâmetro do material que dá esse desvio.

A velocidade de propagação v da luz em um meio é distinta da sua velocidade de propagação no vácuo c e é dada por:

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

Na equação, n é o índice de refração do meio.

Frisamos que a velocidade da luz, dada por $c = 3.10^8$ m/s no vácuo, é a maior velocidade que pode ser atingida por um objeto em movimento.

Quando a luz se propaga em um meio, ocorre também alteração de seu comprimento de onda, dada por:

$$n = \frac{\lambda}{\lambda_n}$$

Na equação, λ é o comprimento de onda da luz no vácuo e λ_n é o comprimento de onda da luz no meio cujo índice de refração é n .

A refração que um raio de luz sofre ao atravessar entre dois meios (meio 1 e meio 2) é dada pela lei de Snell-Descartes:

$$n_1 \cdot \text{sen}(\theta_1) = n_2 \cdot \text{sen}(\theta_2)$$

Verificamos que o ângulo de refração tem um limite e que, acima desse limite, temos reflexão, e não refração.

O ângulo máximo de refração é dado por:

$$\theta_1 = \arcsen\left(\frac{n_2}{n_1}\right)$$

Teremos reflexão interna total para ângulos de incidência superiores ao ângulo θ_c , obtido por:

$$\text{sen}(\theta_c) = \frac{n_2}{n_1}, (n_1 > n_2)$$

Posteriormente, estudamos alguns dispositivos ópticos, como o dioptro plano e a câmara escura de orifício.

O dioptro plano é composto por dois meios distintos e transparentes, cuja interface entre os meios é um plano. A relação entre a altura d de um objeto em um meio de índice de refração n_1 e a altura d' de sua imagem em um meio de índice de refração n_2 é dada por:

$$\frac{d}{d'} = \frac{n_2}{n_1}$$

Analizamos a câmara escura de orifício e como ela produz imagens, inclusive imagens reduzidas e ampliadas em relação ao tamanho original do objeto.

Prosseguimos com o estudo das ondas. Vimos o conceito de período, que é o intervalo de tempo entre dois mínimos ou dois máximos sucessivos da onda, e o conceito de frequência, que é o número de oscilações por unidade de tempo de uma onda.

O período T de uma onda relaciona-se com sua frequência f por:

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

A pulsação ω de uma onda relaciona-se com seu período T por:

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

A pulsação ω de uma onda relaciona-se com sua frequência f por:

$$\omega = 2\pi \cdot f$$

O comportamento espacial da onda é determinado pelo número de onda k , que se relaciona com o comprimento de onda λ por:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

O comprimento de onda é a distância física entre dois máximos ou dois mínimos sucessivos da onda.

A velocidade v de propagação de uma onda pode ser calculada por:

$$v = \lambda \cdot f$$

A posição y de uma onda pode ser calculada em função do espaço x e do tempo t por:

$$y(x,t) = A \cdot \cos(k \cdot x - \omega \cdot t + \delta)$$

Na equação, A é a amplitude da onda e δ é a diferença de fase.

Podemos ter ondas mecânicas unidimensionais com dois comportamentos:

- ondas progressivas, cuja propagação se dá no sentido positivo de dada orientação;
- ondas regressivas, quando a propagação se dá no sentido negativo de dada orientação.

A equação de uma onda progressiva é:

$$y(x,t) = A \cdot \cos(k \cdot x - \omega \cdot t + \delta)$$

A equação de uma onda regressiva é:

$$y(x,t) = A \cdot \cos(k \cdot x + \omega \cdot t + \delta)$$

Em seguida, aplicamos os conceitos vistos em ondas mecânicas para ondas eletromagnéticas. Uma onda eletromagnética é composta por um campo elétrico e um campo magnético, acoplados em planos perpendiculares, oscilando de forma periódica no espaço e no tempo.

O campo elétrico E e o campo magnético B de uma onda eletromagnética são dados por:

$$E = E_m \cdot \cos(k \cdot x - \omega \cdot t)$$

$$B = B_m \cdot \cos(k \cdot x - \omega \cdot t)$$

As amplitudes E_m do campo elétrico e B_m do campo magnético relacionam-se por:

$$E_m = \frac{B_m}{c}$$

Na equação, c é a velocidade da luz, igual a $3 \cdot 10^8$ m/s quando o meio é o vácuo.

Abordamos os conceitos de coerência e de interferência, e, para tanto, exploramos a superposição de ondas.

Para o caso de duas ondas incidentes idênticas (com mesmos valores de amplitude, número de onda, pulsação e fase inicial), a superposição dessas ondas gera uma onda resultante cuja equação é:

$$y = 2A \cdot \cos\left(\frac{\delta}{2}\right) \cdot \cos\left(k \cdot x - \omega \cdot t + \frac{\delta}{2}\right)$$

Vimos, então, o conceito de ondas coerentes, que são ondas nas quais há correlação entre as fases. Quando as fases das ondas são idênticas, dizemos que as ondas estão em fase.

Detalhamos os conceitos de interferência construtiva e de interferência destrutiva. A interferência construtiva ocorre quando sobrepomos ondas em fase, e a amplitude da onda resultante é igual à soma da amplitude das ondas individuais. Na interferência destrutiva, a diferença de fase é $\pi/2$, de forma que um máximo de uma onda se sobrepõe a um mínimo da outra onda, e a onda resultante tem amplitude nula.

Explicamos os mecanismos de propagação de ondas luminosas em fibras ópticas.

As fibras ópticas são compostas por um núcleo de material vítreo ou plástico, circundado por um material de índice de refração menor do que o índice de refração do núcleo, que, por sua vez, é envolvido por uma capa com o intuito de proteger a estrutura da fibra.

A luz incide em uma das pontas da fibra e propaga-se por reflexões internas totais entre o núcleo e o envoltório da fibra. Nessa interface de entrada, da ponta da fibra, parte da radiação é refletida, o que é quantificado por um parâmetro chamado refletância, dado por:

$$r_{\text{refl}} = \left(\frac{n_1 - n_a}{n_1 + n_a} \right)^2$$

Na equação, n_1 é o índice de refração do material do núcleo da fibra e n_a é o índice de refração do ar.

Para garantir que haja a ocorrência das reflexões internas que permitem a transmissão de luz pela fibra, o ângulo de incidência dessa luz deve ser menor do que o ângulo da abertura numérica da fibra, dada por:

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

Na equação, n_2 é o índice de refração do material do revestimento da fibra, e n_1 , o índice de refração do material do núcleo da fibra.

Abordamos os tipos de fibras, apresentando suas características físicas e suas aplicações. Esses tipos são:

- fibra monomodo;
- fibra multimodo.

As fibras multimodo podem ser classificadas em fibras *step index* (índice degrau) e fibras *graded index* (índice graduado). As fibras monomodo têm núcleos de diâmetros menores do que os diâmetros das fibras multimodo. As fibras monomodo transmitem informação de maneira mais rápida, pois são necessárias menos reflexões para que o sinal trafegue pela fibra, mas têm custo mais elevado do que as fibras multimodo.

Exploramos, também, as vantagens e as desvantagens do uso de fibras ópticas. Entre as vantagens das fibras ópticas, estão: não serem afetadas por interferências eletromagnéticas, não sofrerem reações químicas, não produzirem faíscas em caso de rompimento, proporcionarem maior velocidade e maior capacidade de transmissão de informações. Além disso, elas têm peso menor e maior vida útil do que cabos de cobre e apresentam uma estrutura elástica que permite a expansão da rede de comunicação. Como desvantagens do uso de fibras ópticas, citamos o custo elevado e a fragilidade maior em relação aos fios de cobre. Quando usadas para transmitir informação a grandes distâncias, redes de fibra óptica precisam de amplificadores de sinal para garantir que a informação chegue ao seu destino.



Exercícios

Questão 1. Considere o quadro a seguir, que mostra os índices de refração para alguns materiais, à temperatura de 20 °C, para radiação de comprimento de onda de 589 nm no vácuo.

Quadro 7 – Índices de refração para alguns materiais, à temperatura de 20 °C, para radiação de comprimento de onda de 589 nm no vácuo

Substância	Índice de refração (n)
Ar (T = 0 °C e P = 1 atm)	1,000
Água	1,333
Benzeno	1,501

Adaptado de: SERWAY, R. A.; JR. JEWETT, J. W. *Physics for scientists and engineers*. 9. ed. Stamford: Cengage Learning, 2013.

Com base nos dados do quadro e nos seus conhecimentos, assinale a alternativa que mostra corretamente a diferença das velocidades de propagação da luz na água e no benzeno.

- A) $2,51 \cdot 10^8$ m/s.
- B) $1,99 \cdot 10^8$ m/s.
- C) $1,33 \cdot 10^8$ m/s.
- D) $1,71 \cdot 10^7$ m/s.
- E) $2,52 \cdot 10^7$ m/s.

Resposta correta: alternativa E.

Análise da questão

Podemos determinar a velocidade v_a de propagação da luz na água usando a equação que relaciona a velocidade de propagação da luz c no vácuo ($c = 3.10^8$ m/s) com o índice de refração n_a ($n_a = 1,333$) da água, conforme mostrado a seguir.

$$n_a = \frac{c}{v_a} \rightarrow 1,333 = \frac{3.10^8}{v_a} \rightarrow v_a = \frac{3.10^8}{1,333} \rightarrow v_a = 2,251.10^8 \text{ m/s}$$

Podemos determinar a velocidade v_b de propagação da luz no benzeno usando a equação que relaciona a velocidade de propagação da luz c no vácuo ($c = 3.10^8$ m/s) com o índice de refração n_b ($n_b = 1,501$) do benzeno, conforme mostrado a seguir.

$$n_b = \frac{c}{v_b} \rightarrow 1,501 = \frac{3.10^8}{v_b} \rightarrow v_b = \frac{3.10^8}{1,501} \rightarrow v_b = 1,999.10^8 \text{ m/s}$$

Logo, a diferença entre as velocidades determinadas anteriormente é calculada como mostrado a seguir.

$$v_a - v_b = 2,251.10^8 - 1,999.10^8 = (2,251 - 1,999).10^8$$

$$v_a - v_b = 0,252.10^8 \text{ m/s}$$

$$v_a - v_b = 2,52.10^7 \text{ m/s}$$

Questão 2. As ondas estacionárias são um tipo especial de interferência e desempenham importante papel em fenômenos como, por exemplo, a produção de notas musicais em um tubo de órgão e a emissão de luz pelos átomos. Elas são formadas pela combinação de duas ondas senoidais de mesma frequência, amplitude e comprimento de onda, mas que se propagam em sentidos opostos.

Nesse contexto, considere duas ondas que se propagam em sentidos opostos e produzem uma onda estacionária, cujas funções individuais são:

$$y_1(x, t) = 4,0 \cdot \sin(3,0x - 2,0t)$$

$$y_2(x, t) = 4,0 \cdot \sin(3,0x + 2,0t)$$

Nas equações, x e y são medidos em centímetros e t é medido em segundos.

Com base no exposto e nos seus conhecimentos, avalie as afirmativas a seguir e a relação entre elas.

I – O comprimento de onda das ondas que se propagam vale $\lambda = \frac{2\pi}{5}$ cm.

PORQUE

II – A expressão para a onda estacionária resultante pode ser $y(x,t) = 8,0 \cdot \sin(3,0 \cdot x) \cdot \cos(2,0 \cdot t)$.

Assinale a alternativa correta.

A) A primeira afirmativa é verdadeira, e a segunda é falsa.

B) A primeira afirmativa é falsa, e a segunda é verdadeira.

C) As duas afirmativas são falsas.

D) As duas afirmativas são verdadeiras, e a primeira justifica a segunda.

E) As duas afirmativas são verdadeiras, e a primeira não justifica a segunda.

Resposta correta: alternativa B.

Análise das afirmativas

I – Afirmativa incorreta.

Justificativa: como o número de onda k é o termo da equação da onda estacionária que multiplica o termo da posição, temos $k = 3 \text{ cm}^{-1}$. Logo, o comprimento de onda, no caso em estudo, é $\lambda = \frac{2\pi}{3} \text{ cm}$, pois $k = \frac{2\pi}{\lambda} \Leftrightarrow \lambda = \frac{2\pi}{k}$.

II – Afirmativa correta.

Justificativa: considere duas ondas de equações $y_1(x,t) = A \cdot \sin(kx - \omega t)$ e $y_2(x,t) = A \cdot \sin(kx + \omega t)$, com amplitude A , pulsação ω e número de onda k , propagando-se em sentidos opostos. O resultado da interferência dessas duas ondas é uma onda estacionária de equação:

$$y(x,t) = (2A \cdot \sin(kx)) \cdot \cos(\omega t)$$

Das equações do enunciado, vemos que a amplitude das ondas é $A = 4,0 \text{ cm}$, o número de onda é $k = 3,0 \text{ cm}^{-1}$ e a pulsação é $\omega = 2,0 \text{ rad/s}$. A equação da onda estacionária pode ser escrita como:

$$y(x,t) = (2 \cdot 4,0 \cdot \sin(3,0 \cdot x)) \cdot \cos(2,0 \cdot t)$$

$$y(x,t) = (8,0 \cdot \sin(3,0 \cdot x)) \cdot \cos(2,0 \cdot t)$$

FIGURAS E ILUSTRAÇÕES

Figura 2

NUSSENZVEIG, H. M. *Curso de física básica: fluidos, oscilações e ondas e calor*. São Paulo: Edgard Blucher, 1997. v. 2, p. 5.

Figura 9

SERWAY, R. A.; JEWETT JR., J. W. *Physics for scientists and engineers*. 9. ed. Stamford: Cengage Learning, 2013. p. 870.

Figura 12

FLASH-2568383_960_720.JPG. Disponível em: https://cdn.pixabay.com/photo/2017/08/01/22/38/flash-2568383_960_720.jpg. Acesso em: 6 nov. 2020.

Figura 16

G1 TOCANTINS. *Tarifa Social dará desconto de 100% na energia elétrica; veja como se cadastrar*. 30 abr. 2020. Disponível em: <https://g1.globo.com/to/tocantins/noticia/2020/04/30/tarifa-social-dara-desconto-de-100percent-na-energia-eletrica-veja-como-se-cadastrar.ghtml>. Acesso em: 6 nov. 2020.

Figura 17

RESISTOR-32290_960_720.PNG. Disponível em: https://cdn.pixabay.com/photo/2012/04/13/12/55/resistor-32290_960_720.png. Acesso em: 18 jan. 2021.

Figura 28

FOGAÇA, J. R. V. Pilha seca de Leclanché. *Brasil Escola*. [s.d.]. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/quimica/pilha-seca-leclanche.htm>. Acesso em: 6 nov. 2020.

Figura 41

MARIEB, E. N.; WILHELM, P. B.; MALLAT, J. *Anatomia humana*. 7. ed. São Paulo: Pearson Education, 2014. p. 510.

Figura 42

MARIEB, E. N.; WILHELM, P. B.; MALLAT, J. *Anatomia humana*. 7. ed. São Paulo: Pearson Education, 2014. p. 514.

Figura 43

NAVE, C. R. Circular aperture diffraction. *HyperPhysics*, Georgia State University, 2016. Disponível em: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/phyopt/cirapp.html>. Acesso em: 3 nov. 2020.

Figura 44

KELLER, F. J.; GETTYS, W. E.; SKOVE, M. J. *Física*. São Paulo: Makron Books, 1999. v. 2, p. 491.

Figura 45

RINGS-66620_960_720.JPG. Disponível em: https://cdn.pixabay.com/photo/2012/11/19/15/16/rings-66620_960_720.jpg. Acesso em: 15 jan. 2021.

Figura 46

JOKURA, T. Como funciona o raio *laser*? *Superinteressante*, 1º set. 2011. Disponível em: <https://super.abril.com.br/mundo-estranho/como-funciona-o-raio-laser/>. Acesso em: 27 out. 2020.

Figura 47

KELLER, F. J.; GETTYS, W. E.; SKOVE, M. J. *Física*. São Paulo: Makron Books, 1999. v. 2, p. 411.

Figura 50

UFMG. Reflexão total. *Sala de Demonstrações de Física*. [s.d.]. Disponível em: <http://demonstracoes.fisica.ufmg.br/artigos/ver/84/7.-Reflexao-Total>. Acesso em: 30 out. 2020.

Figura 51

SERWAY, R. A.; JEWETT JR., J. W. *Physics for scientists and engineers*. 9. ed. Stamford: Cengage Learning, 2013. p. 1065.

Figura 52

GUIA ESTUDO. *Refração*. [s.d.]. Disponível em: <https://www.guiaestudo.com.br/refracao>. Acesso em: 28 out. 2020.

Figura 53

ELECTROMAGNETIC_SPECTRUM-PT_BR.SVG. Disponível em: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/66/Electromagnetic_spectrum-pt_br.svg. Acesso em: 28 out. 2020.

Figura 58

G1. *Índios registram com celular disputas nos Jogos Indígenas, no Tocantins*. 7 nov. 2011. Disponível em: <http://g1.globo.com/brasil/noticia/2011/11/indios-registram-com-celular-disputas-nos-jogos-indigenas-no-tocantins.html>. Acesso em: 30 out. 2020.

Figura 65

KELLER, F. J.; GETTYS, W. E.; SKOVE, M. J. *Física*. São Paulo: Makron Books, 1999. v. 2, p. 394.

Figura 68

GALLAS, M. R. *Coerência*. [s.d.]. Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/~marcia/coerencia.pdf>. Acesso em: 4 nov. 2020.

Figura 69

SERWAY, R. A.; JEWETT JR., J. W. *Physics for scientists and engineers*. 9. ed. Stamford: Cengage Learning, 2013. Adaptada.

Figura 70

KANDUS, A.; GUTMANN, F. W.; CASTILHO, C. M. C. A física das oscilações mecânicas em instrumentos musicais: exemplo do berimbau. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 28, n. 4, 2006. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172006000400004&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 4 nov. 2020.

Figura 71

LIGHT-1502758_960_720.JPG. Disponível em: https://cdn.pixabay.com/photo/2016/07/07/17/00/light-1502758_960_720.jpg. Acesso em: 6 nov. 2020.

Figura 72

YOUNG, P. H. *Técnicas de comunicação eletrônica*. 5. ed. São Paulo: Pearson Education, 2006. p. 598.

Figura 73

YOUNG, P. H. *Técnicas de comunicação eletrônica*. 5. ed. São Paulo: Pearson Education, 2006. p. 595.

Figura 74

YOUNG, P. H. *Técnicas de comunicação eletrônica*. 5. ed. São Paulo: Pearson Education, 2006. p. 614.

REFERÊNCIAS

Audiovisuais

COMO FAZER um eletroscópio caseiro. 2015. 1 vídeo (9 min). Publicado pelo canal Brincando com Ideias. Disponível em: <https://youtu.be/nHsilwsL86Y>. Acesso em: 21 out. 2020.

ONDA estacionária (em cordas). 2017. 1 vídeo (3 min). Publicado pelo canal Azeheb Laboratórios Educacionais. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=jplFqvqW6V8>. Acesso em: 4 nov. 2020.

ONDAS EM: animação. [s.d.]. Disponível em: http://www.rc.unesp.br/showdefisica/99_Explor_Eletrizacao/paginas%20htmls/Ondas%20EM%20anima%C3%A7%C3%A3o.htm. Acesso em: 4 nov. 2020.

TEMA 01: a carga elétrica e o spin: experimentos: eletrização por atrito. 2016. 1 vídeo (2 min). Publicado pela canal Física Universitária. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=_3l7DcJgNd0. Acesso em: 6 nov. 2020.

TUTORIAL: como fazer uma câmera pinhole. 2015. 1 vídeo (3 min). Publicado pelo canal focaestadao. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=EOJKUCZfyfl>. Acesso em: 30 out. 2020.

VIVID PLANET SOFTWARE GMBH. *Resistor Code Calculator*. 2016. Disponível em: https://play.google.com/store/apps/details?id=com.vivid_planet.resistor. Acesso em: 27 out. 2020.

WAVE interference. 2007. 1 vídeo (24 seg). Publicado pelo canal Animations for Physics and Astronomy. 20 dez. 2007. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=PCYv0_qPk-4. Acesso em: 6 nov. 2020.

Textuais

ABNT. *NBR 14566: cabo óptico dielétrico para aplicação subterrânea em duto e aérea espinado: especificação*. São Paulo: ABNT, 2020.

ALMEIDA, C. M. V. B.; DOI, C. M. *Explicando física e química*. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2018.

BOULOS, P.; CAMARGO, I. *Geometria analítica: um tratamento vetorial*. 3. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004.

CISCO. *Introdução a fibras ópticas, dB, atenuação e medições*. 20 abr. 2015. Disponível em: https://www.cisco.com/c/pt_br/support/docs/optical/synchronous-digital-hierarchy-sdh/29000-db-29000.html. Acesso em: 4 nov. 2020.

CÓDIGO de cores para resistores. [s.d.]. Disponível em: https://www.inf.pucrs.br/~calazans/undergrad/laborg/cod_cores_res.html. Acesso em: 26 out. 2020.

FLINT glass. In: WIKIPEDIA. [s.d.]. Disponível em: https://en.wikipedia.org/wiki/Flint_glass. Acesso em: 28 out. 2020.

FS COMMUNITY. *Step-index multimode fiber vs graded-index multimode fiber*. 2020. Disponível em: <https://community.fs.com/blog/step-index-multimode-fiber-vs-graded-index-multimode-fiber.html>. Acesso em: 4 nov. 2020.

GALLAS, M. R. *Coerência*. [s.d.]. Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/~marcia/coerencia.pdf>. Acesso em: 4 nov. 2020.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. *Fundamentos de física*. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009. v. 2 e 3.

KANDUS, A.; GUTMANN, F. W.; CASTILHO, C. M. C. A física das oscilações mecânicas em instrumentos musicais: exemplo do berimbau. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 28, n. 4, 2006. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172006000400004&lng=en&nrm=i so. Acesso em: 4 nov. 2020.

KEISER, G. *Comunicações por fibras ópticas*. 4. ed. São Paulo: AMGH, 2014.

KELLER, F. J.; GETTYS, W. E.; SKOVE, M. J. *Física*. São Paulo: Makron Books, 1999. v. 2.

KUANG, K.; CANTWELL, W. Detection of impact damage in thermoplastic-based glass fiber composites using embedded optical fiber sensors. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, v. 16, n. 3, p. 213-229, 2003. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/249356737_Detection_of_Impact_Damage_in_Thermoplastic-Based_Glass_Fiber_Composites_Using_Embedded_Optical_Fiber_Sensors/download. Acesso em: 6 nov. 2020.

MAIA, D. J.; BIANCHI, J. C. A. *Química geral*. São Paulo: Pearson, 2007.

MARIEB, E. N.; WILHELM, P. B.; MALLAT, J. *Anatomia humana*. 7. ed. São Paulo: Pearson Education, 2014.

MATTEDE, H. Tipos de capacitores. *Mundo da elétrica*. [s.d.]. Disponível em: <https://www.mundodaeletrica.com.br/tipos-de-capacitores/>. Acesso em: 26 out. 2020.

METALON. *Galvanização eletrolítica*. 10 nov. 2020. Disponível em: <https://www.metalon.com.br/galvanizacao-eletrolitica/>. Acesso em: 26 out. 2020.

NUSSENZVEIG, H. M. *Curso de física básica: eletromagnetismo*. São Paulo: Edgard Blucher, 1997. v. 3.

NUSSENZVEIG, H. M. *Curso de física básica: fluidos, oscilações e ondas e calor*. São Paulo: Edgard Blucher, 1997. v. 2.

PHYS 1420: College Physics II. 2018. Disponível em: <https://faculty.uca.edu/njaustin/PHYS1420/Laboratory/resistivity.pdf>. Acesso em: 30 out. 2020.

PINHEIRO, J. M. S. *Redes ópticas de acesso em telecomunicações*. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

SANTOS, C. A. *Experimento da gota de óleo de Millikan*. 2012. Disponível em: <https://www.if.ufrgs.br/historia/millikan.html>. Acesso em: 30 out. 2020.

SERWAY, R. A.; JEWETT JR., J. W. *Physics for scientists and engineers*. 9. ed. Stamford: Cengage Learning, 2013.

STEWART, J. *Cálculo*. 6. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2009. v. 1.

TELECOMMUNICATIONS INDUSTRY ASSOCIATION (TIA). *Optical Fiber Cable Color Coding*. Revision D, 2014.

TIPLER, P. A.; MOSCA, G. *Física para cientistas e engenheiros*. Rio de Janeiro: LTC, 2006. v. 1 a 3.

VIDRO crown. In: WIKIPÉDIA. [s.d.]. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Vidro_crown. Acesso em: 28 out. 2020.

YOUNG, P. H. *Técnicas de comunicação eletrônica*. 5. ed. São Paulo: Pearson Education, 2006.

ZILIO, S. C. *Óptica moderna: fundamentos e aplicações*. São Carlos: USP, 2009. Disponível em: <http://www.fotonica.ifsc.usp.br/ebook/book1/Optica-Moderna.pdf>. Acesso em: 6 nov. 2020.

Sites

<http://www.thepinholething.com/pinhole-photography/>

<https://chriskeeney.com/pinhole/>

<https://www.stevendempseyphotography.com/portfolio-pinhole.html>



Handwriting practice lines consisting of 30 horizontal lines. Each line set includes a solid top line, a dashed midline, and a solid bottom line, providing a guide for letter height and placement.



A series of horizontal lines for writing, consisting of 30 evenly spaced lines across the page.



Interativa

Informações:
www.sepi.unip.br ou 0800 010 9000