



UNIDADE II

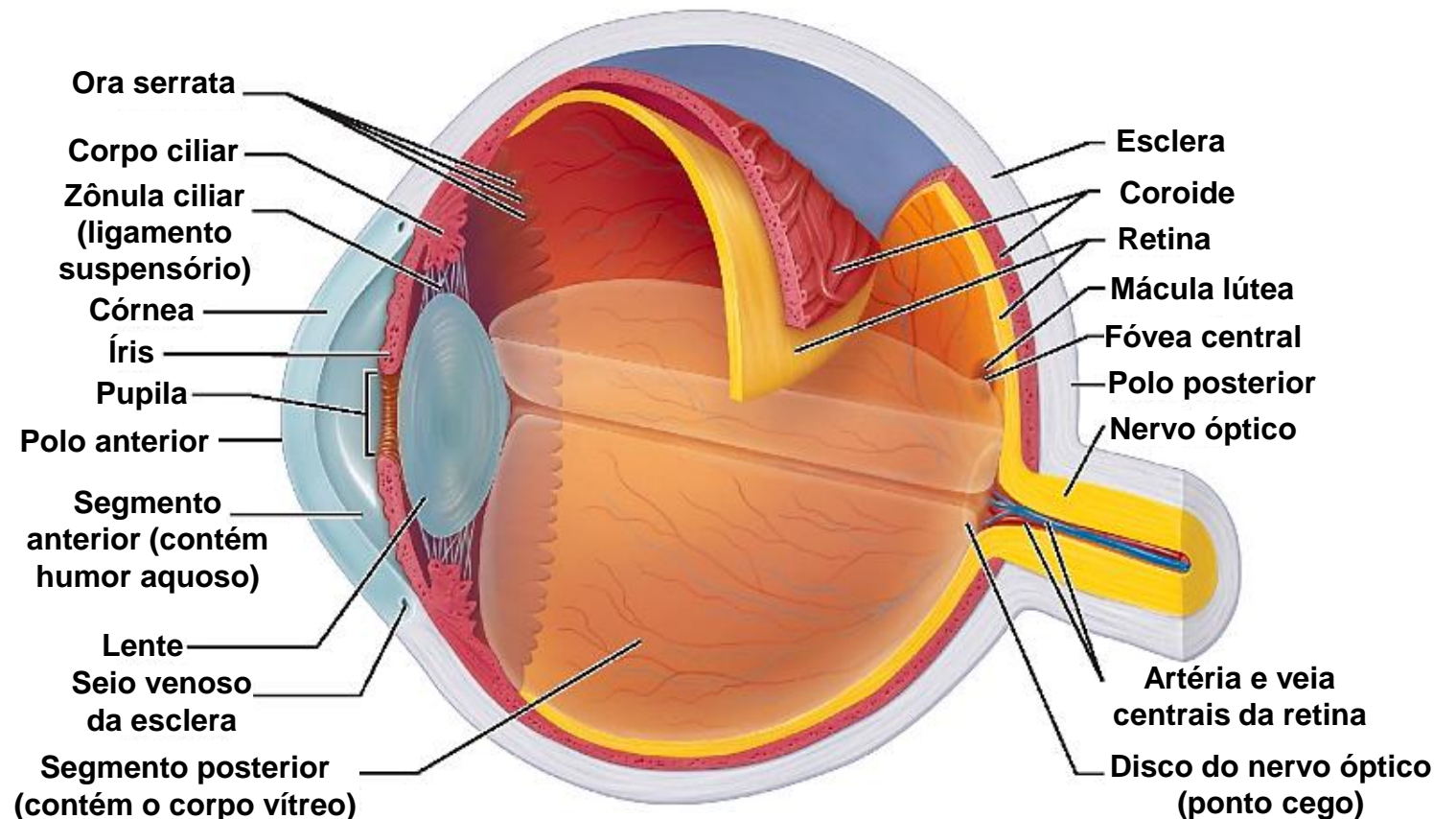
Física para Computação

Prof. Dr. Kauê Rosalem

O olho como instrumento óptico

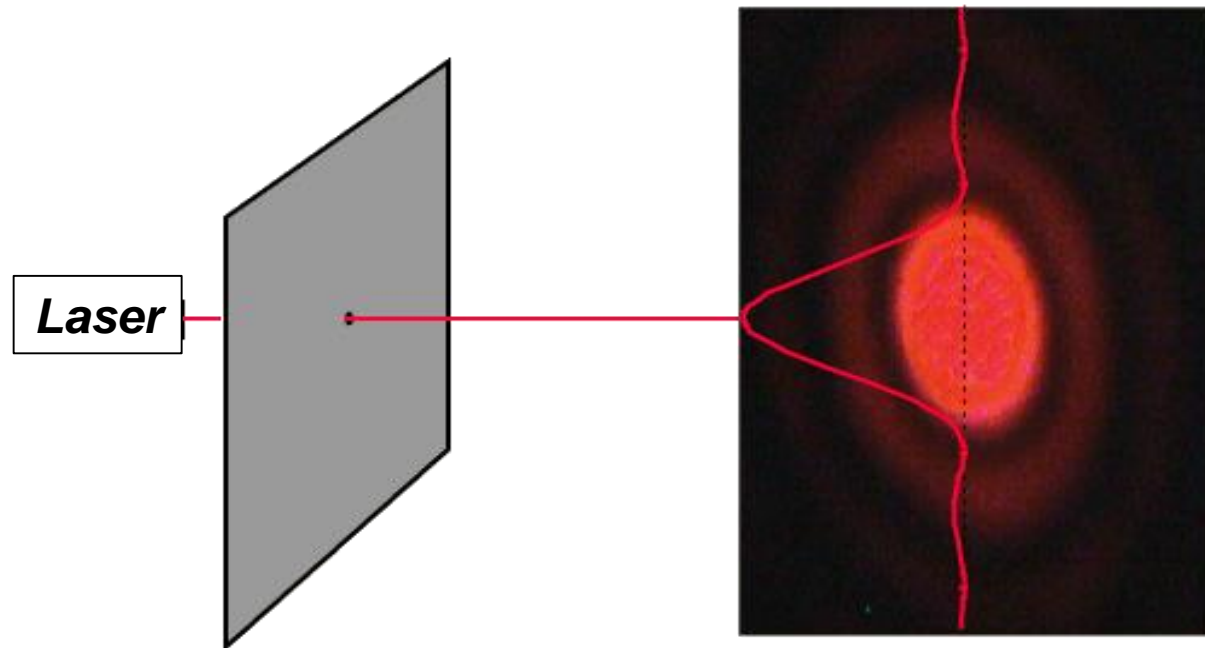
- A luz incide no olho da esquerda para a direita, atingindo o polo anterior do olho, onde se encontra a córnea. A parte anterior do olho tem um formato curvo, é transparente e atua, junto com a lente do cristalino, para focar os raios de luz na parte traseira do olho. Essa luz incide na retina, onde 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.

Ilustração diagramática da estrutura interna do olho humano. O corpo vítreo é ilustrado, apenas, em sua parte inferior.
Fonte: Adaptado de: MARIEB.



O olho como instrumento óptico

- O olho atua como um instrumento óptico, de forma que apresenta a 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 a abertura circular. O máximo central do padrão de Fraunhofer é chamado de disco de Airy.



Padrão de difração de Fraunhofer para a abertura circular.

Fonte: Adaptado de: NAVE.

Princípios da Óptica Geométrica

- Óptica Geométrica é um ramo da Física que estuda a forma de propagação da luz; a 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; já o raio de luz pode ser entendido como um *laser*.



Fonte: https://www.freepik.com/free-photo/tree-see-winter-birch-mirroring-rings-wave-water_681322.htm#page=1&query=water%20birch&position=4



Fonte: <https://super.abril.com.br/mundo-estranho/como-funciona-o-raio-laser/>

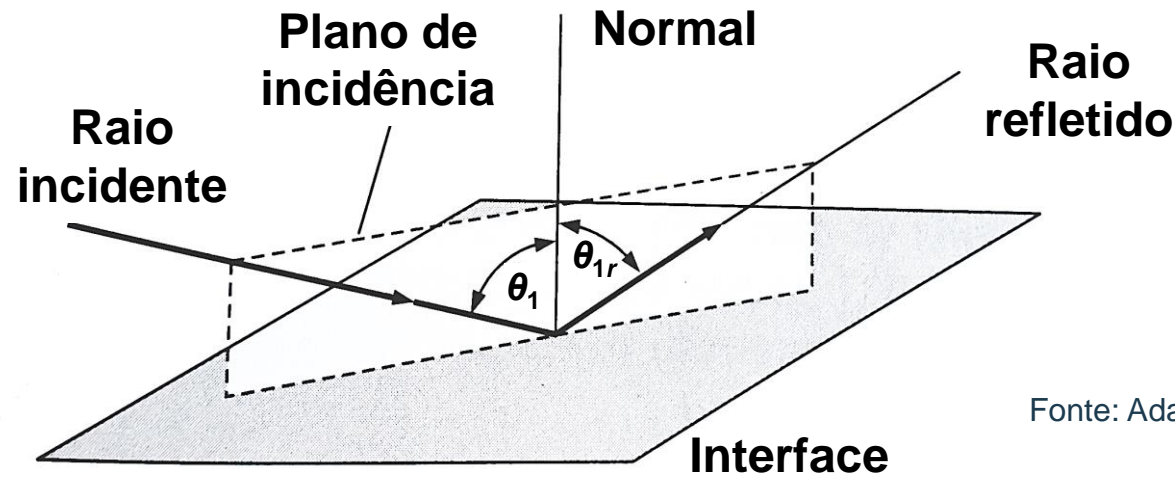
Princípios da Óptica Geométrica

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.

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.



Fonte: Adaptado de: KELLER.

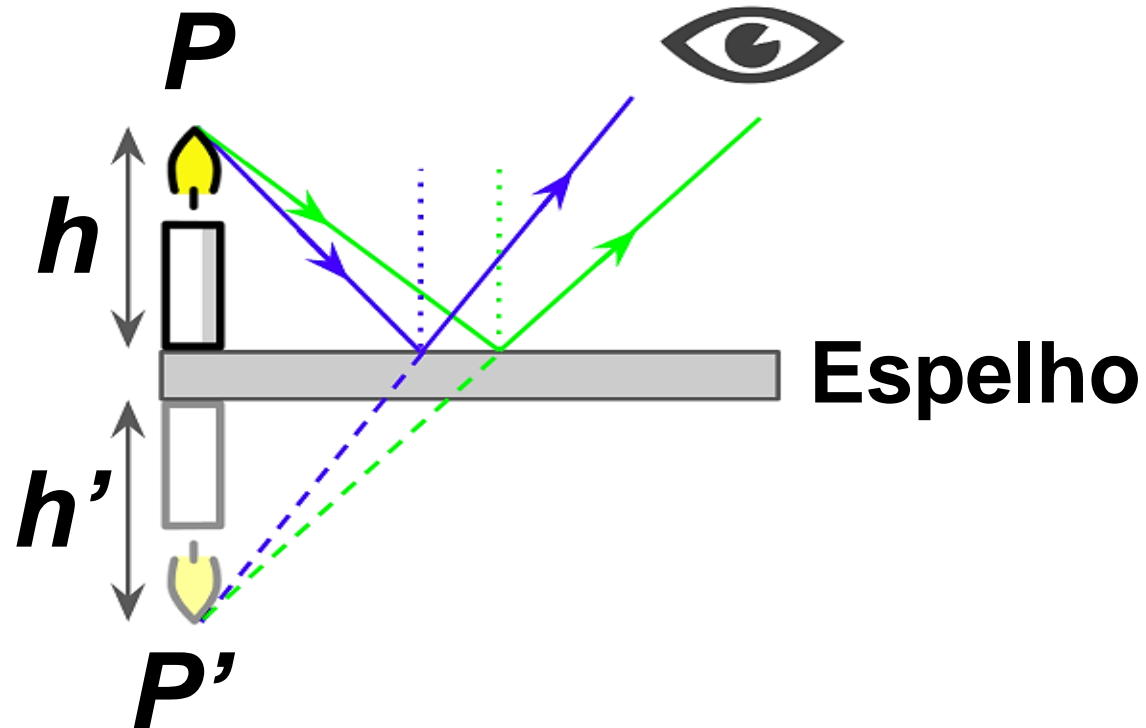
Se o raio incide com ângulo θ_i , em relação à normal à superfície, o raio refletido terá ângulo θ_r em relação à normal à superfície, tal que:

$$\theta_i = \theta_r$$

- Logo, o ângulo de incidência do raio de luz é igual ao ângulo de reflexão.

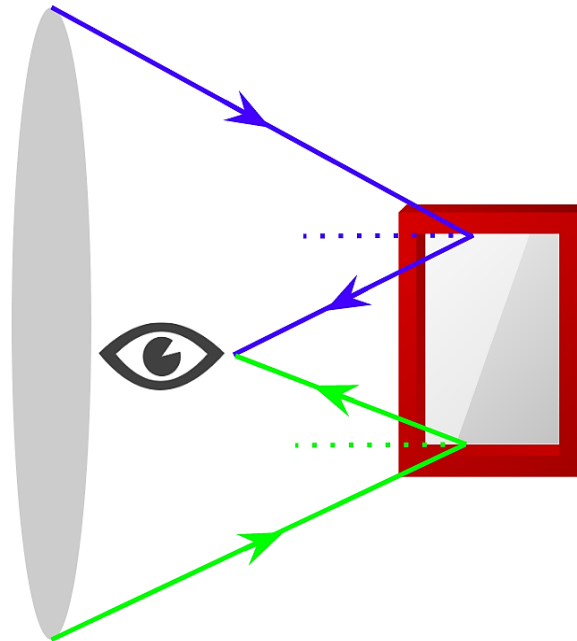
Espelhos planos

- 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.
- Apresentamos o exemplo de formação de uma imagem por um espelho plano. A imagem formada no espelho também é conhecida como imagem virtual.



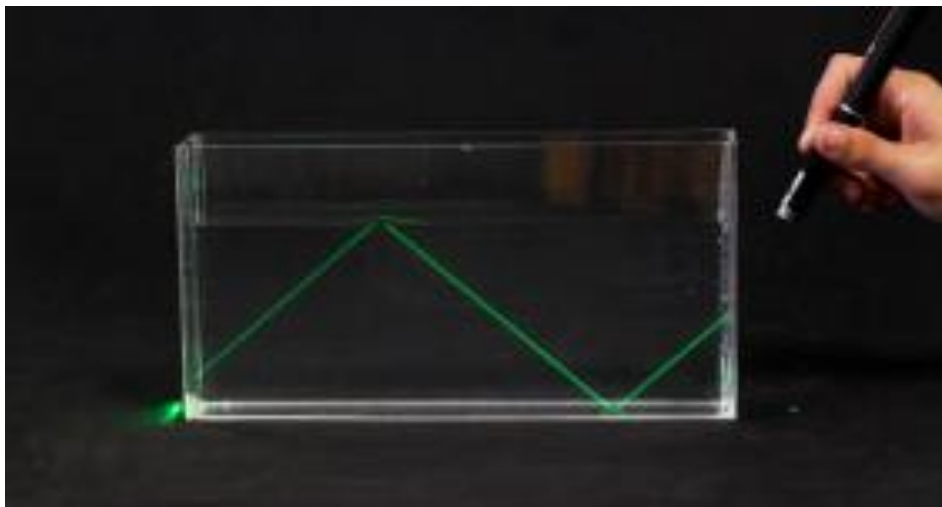
Espelhos planos

- Para obter imagens ampliadas, podemos trabalhar com espelhos de geometrias diferentes, como os 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.
- A representação do limite do campo visual de um espelho plano para um observador.

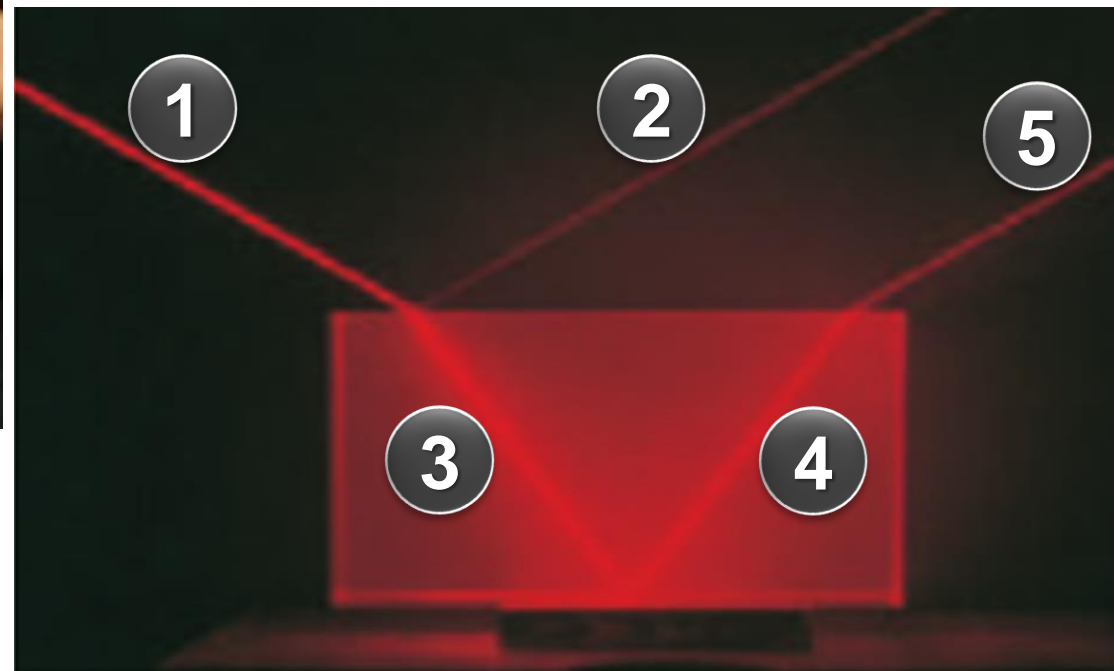


Espelhos planos

- 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. Veremos o cálculo desses parâmetros mais adiante.



Fonte: UFMG. *Reflexão total. Sala de Demonstrações de Física.* [s.d.].



Fonte: Adaptado de: SERWAY; JEWETT (2013).

Refração da luz

- Quando a luz passa de um meio para outro, 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 em que ela atravessa.



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.
- Índices de refração para alguns materiais, à temperatura de 20 °C, para a 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
Álcool etílico	1,361
Benzeno	1,501
Diamante	2,419

Fonte: Adaptado de: SERWAY; JEWETT (2013).

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:

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

Velocidade de propagação em um meio

Exemplo: 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:

- Substituindo a velocidade da luz c por 3.10^8 m/s e o índice de refração para o diamante n por 2,419:

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

$$2,419 = \frac{3.108}{v}$$

$$v = \frac{3.108}{2,419}$$

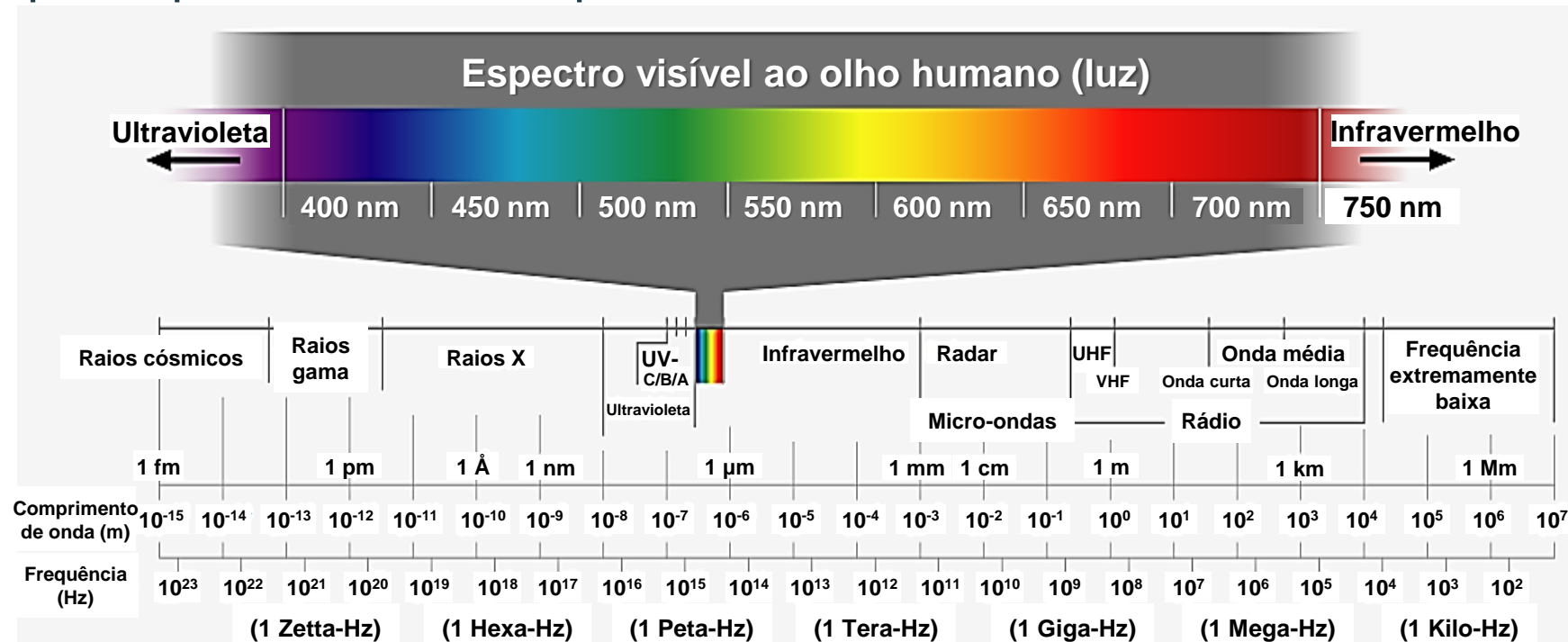
$$v = 1,24.108 \text{ m/s}$$

- Vemos que a velocidade de propagação da luz no diamante é $1,24.10^8$ m/s, ou seja, 41% da velocidade da luz no vácuo.

Velocidade de propagação em um meio

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. A luz pode ser monocromática, quando tem apenas um comprimento de onda ou, apenas, uma cor, ou luz branca, composta por diversos comprimentos de onda.



Velocidade de propagação em um meio

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

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.

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

Velocidade de propagação em um meio

Exemplo: 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 :

- Substituímos, na igualdade anterior, o índice de refração do diamante, $n = 2,419$, e o comprimento de onda da radiação no vácuo, $\lambda = 589$ nm.

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

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

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

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

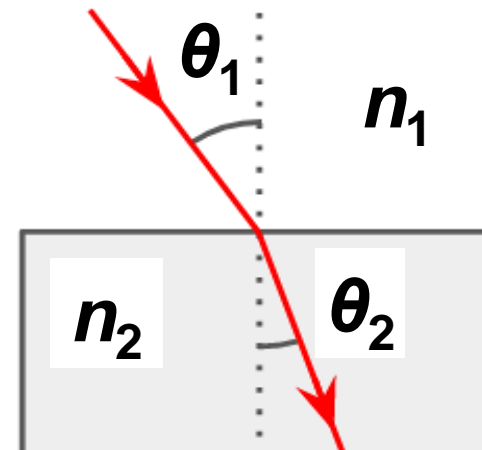
- Vemos que a luz com o comprimento de onda de 589 nm no vácuo, quando passar a se propagar no diamante, tem o seu comprimento de onda alterado para 243,5 nm, o que representa uma mudança de cor, de amarela para a cor ultravioleta, que está fora do espectro de radiação visível.

Lei de Snell-Descartes

- Falamos que a direção de propagação da luz se altera quando ela passa de um meio para o outro, com índices de refração diferentes, embora mantenha a 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 $n_1 \cdot \text{sen}(\theta_1) = n_2 \cdot \text{sen}(\theta_2)$.

- Temos um esquema da difração da luz ao atravessar a interface de dois meios de índice de refração distintos.



Interatividade

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*, onde $n_2 = 1,66$). Qual é o ângulo de refração dessa radiação no vidro?

- a) $11,9^\circ$.
- b) $15,8^\circ$.
- c) $35,2^\circ$.
- d) $45,0^\circ$.
- e) $92,3^\circ$.

Interatividade

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*, onde $n_2 = 1,66$). Qual é o ângulo de refração dessa radiação no vidro?

- Para o vidro *Flint*, $n_2 = 1,66$ e 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.

Começamos com a Lei de Snell-Descartes:

$$\begin{aligned} 1.\text{sen}20^\circ &= 1,66.\text{sen}\theta_2 & \text{sen}\theta_2 &= 0,206 \\ n_1.\text{sen}\theta_1 &= n_2.\text{sen}\theta_2 & 1.0,342 &= 1,66.\text{sen}\theta_2 & \theta_2 &= \arcsen(0,206) \\ \text{sen}\theta_2 &= \frac{0,342}{1,66} & \theta_2 &= 11,9^\circ \end{aligned}$$

Resposta

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*, onde $n_2 = 1,66$). Qual é o ângulo de refração dessa radiação no vidro?

- a) **11,9°.**
- b) 15,8°.
- c) 35,2°.
- d) 45,0°.
- e) 92,3°.

Ondas

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 as 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).

Ondas

- Definimos a frequência f como a quantidade de oscilações ocorridas por unidade de tempo. Usamos o Hertz (Hz) como a 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).

Ondas

- Exemplo: 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).

Ondas

- Indicamos o período T e a amplitude A de uma onda harmônica.

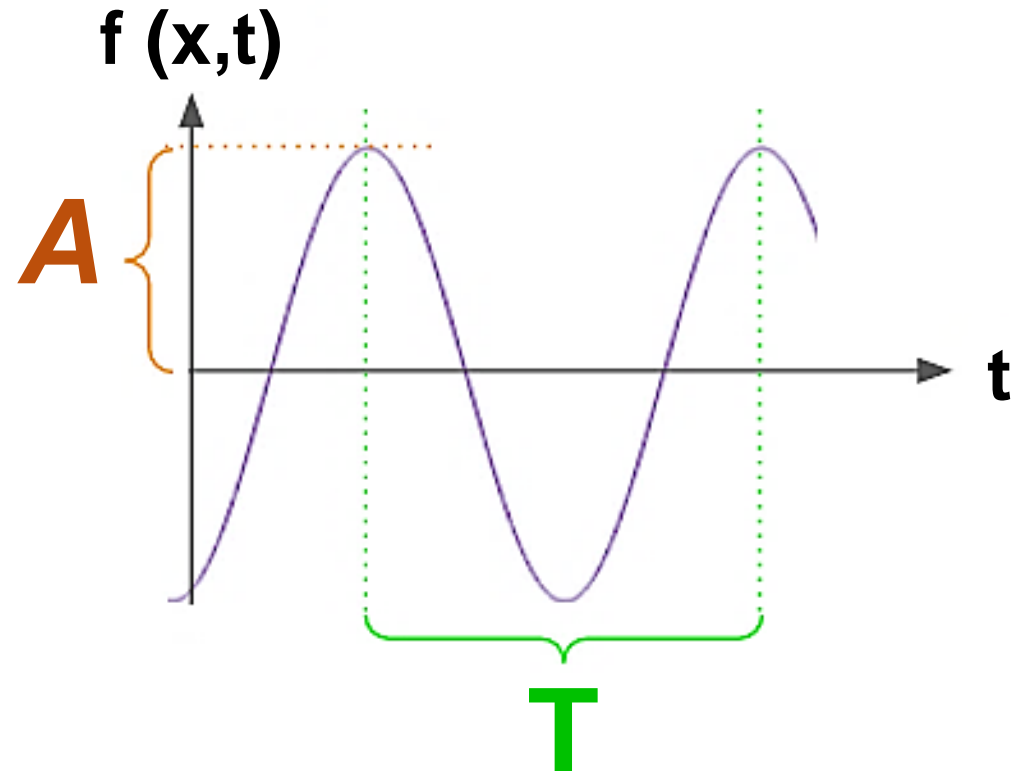
A partir do período, podemos calcular a pulsação ω de uma onda, dada por:

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

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.



Ondas

Exemplo: 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.

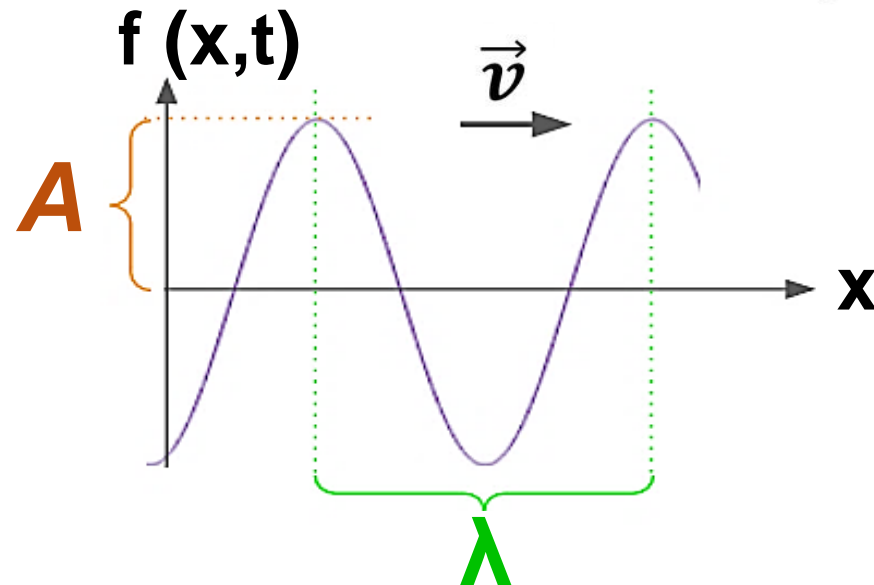
Ondas

- 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 a unidade de comprimento de onda no Sistema Internacional de Unidades (SI).

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: $v = \lambda \cdot f$.



Ondas

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

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.

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

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

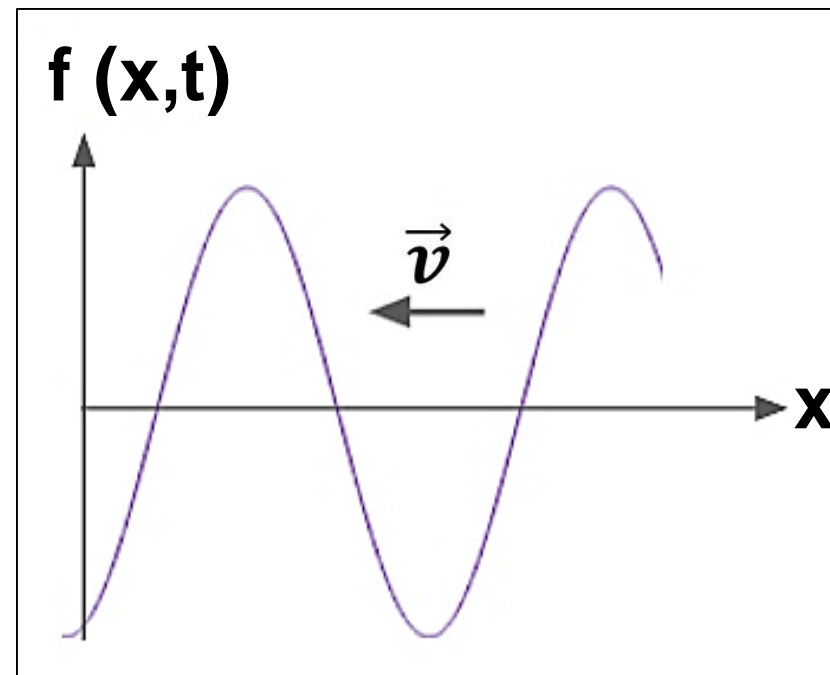
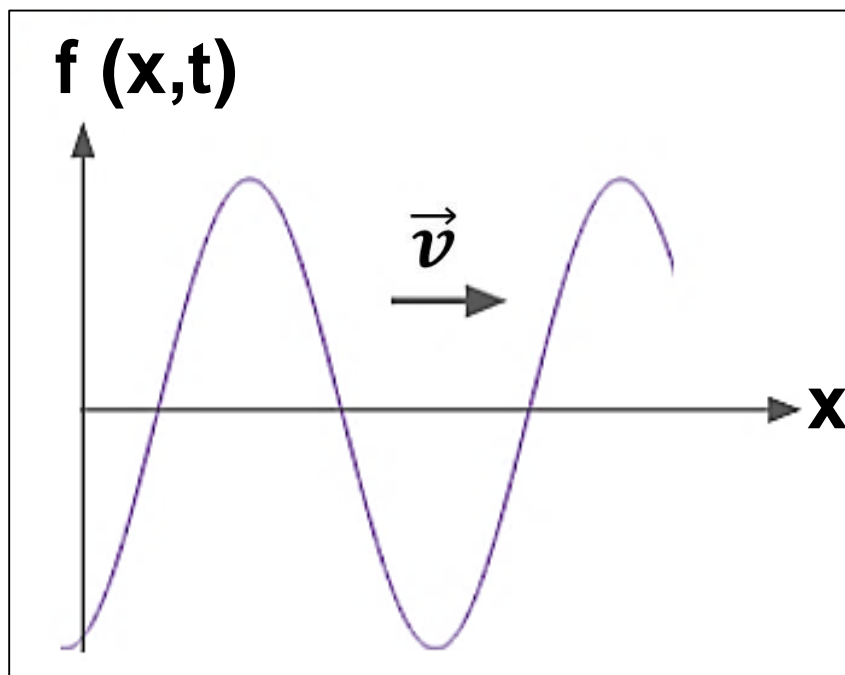
Ondas

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:

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



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 3.10^8 m/s no vácuo.

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

$$\mathbf{E} = \mathbf{Em. cos}(k. x - \omega. t)$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{Bm. cos}(k. x - \omega. t)$$

Ondas eletromagnéticas

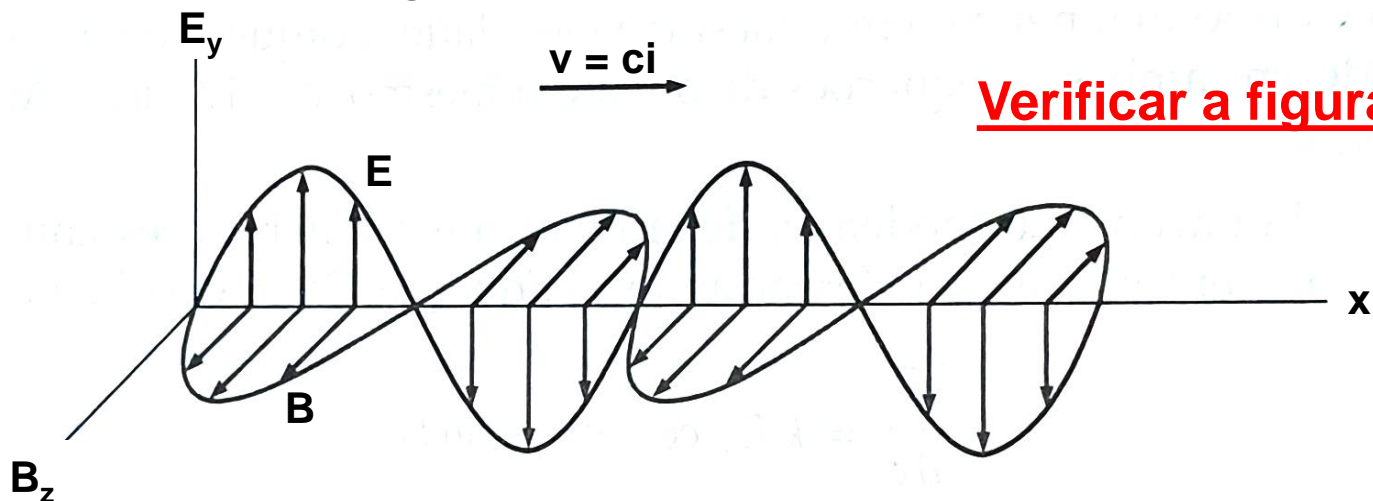
- Nas igualdades, E_m e B_m são as amplitudes do campo elétrico e do campo magnético, respectivamente. Note que, como as ondas estão em fase, o argumento do cosseno deve ser o mesmo nas duas ondas.

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

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

- Representados o campo elétrico e o campo magnético em uma onda eletromagnética.

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:



Verificar a figura

Interatividade

Considere uma onda eletromagnética cujos campos elétrico e magnético são dados a seguir. Determine o sentido de propagação da onda eletromagnética.

- a) Positivo do eixo x.
- b) Negativo do eixo x.
- c) Positivo do eixo y.
- d) Negativo do eixo z.
- e) Positivo do eixo z.

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

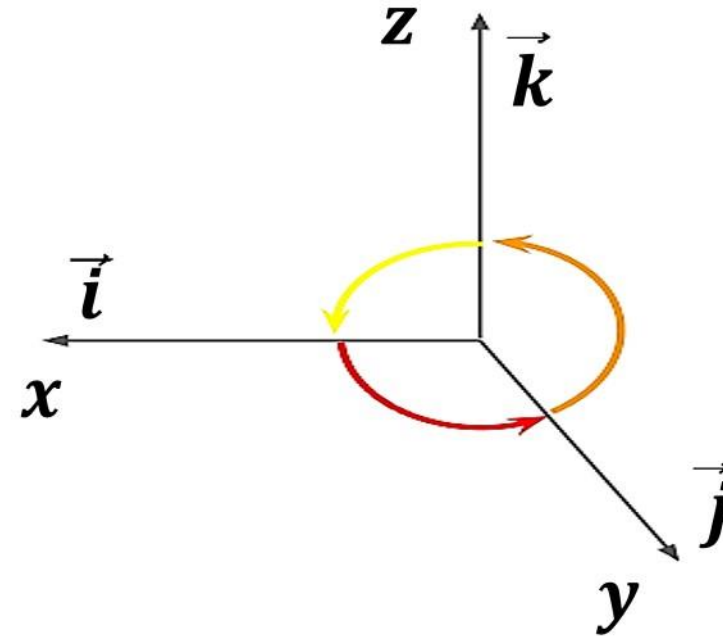
$$\vec{B} = Bm. \cos(k.x - \omega.t) \vec{j}$$

Interatividade

- 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 $\vec{i} \times \vec{j}$.
- Da regra da mão direita, temos que: $\vec{i} \times \vec{j} = \vec{k}$.

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

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



- 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.

Resposta

Considere uma onda eletromagnética cujos campos elétrico e magnético são dados a seguir. Determine o sentido de propagação da onda eletromagnética.

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

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

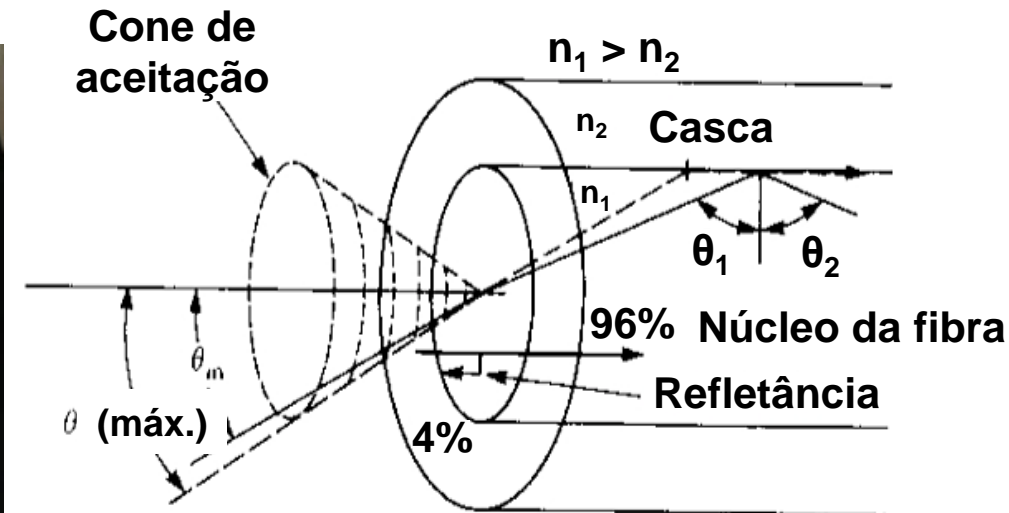
- a) Positivo do eixo x.
- b) Negativo do eixo x.
- c) Positivo do eixo y.
- d) Negativo do eixo z.
- e) Positivo do eixo z.

Princípios de propagação em fibras

- Fibras ópticas são meios para a transmissão de informação por sinais luminosos.
- 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.
- É importante que o revestimento que circunda o núcleo tenha um 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.



Fonte: <https://peakoptical.com/2017/11/fiber-optic-versatile-technology/>



Fonte: Adaptado de: YOUNG (2006).

Princípios de propagação em fibras

- Como o tráfego de informação se dá por reflexões internas, não temos a 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:

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

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.

Princípios de propagação em fibras

Exemplo: 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:

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

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

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

$$refl = (0,2)^2$$

$$refl = 0,04$$

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

$$refl = 4\%$$

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

Princípios de propagação em fibras

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:

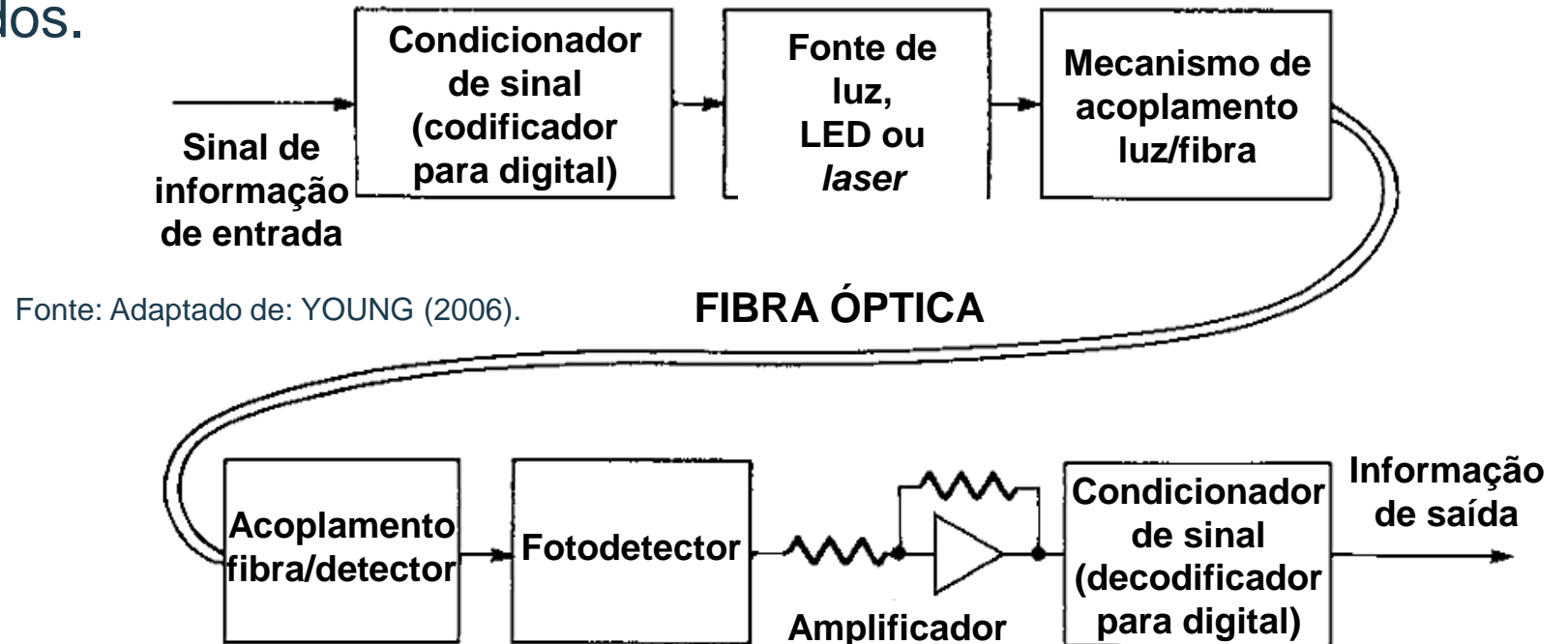
$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

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.

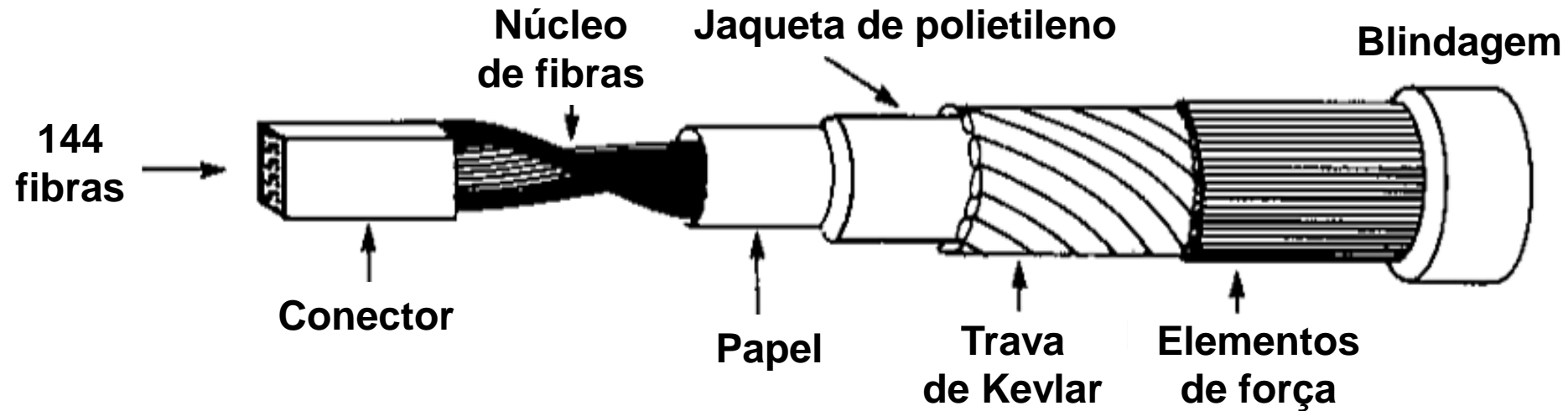
Princípios de propagação em fibras

- 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 as fibras ópticas 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 a fonte de sinal (YOUNG, 2006). Os receptores de sinal são, geralmente, fotodiodos.



Princípios de propagação em fibras

- As fibras podem ser combinadas em pacotes de cabeamentos, 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 a emenda em cabos quando é necessário transmitir informação por distâncias maiores.



Fonte: Adaptado de: YOUNG (2006).

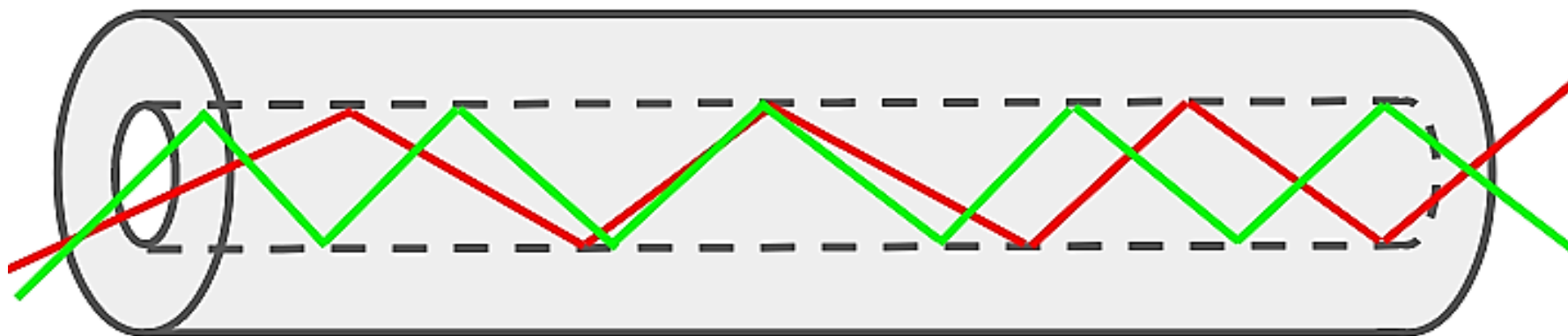
Tipos de fibras

- Os principais tipos de fibra óptica são as fibras monomodo (SM – *single mode*) e multimodo (MM – *multimode*).
- As fibras monomodo têm o 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, o que garante melhor qualidade de sinal, menos interferência e menor perda na transmissão, o que permite o seu emprego em distâncias elevadas. É um cabeamento estruturado com o alcance máximo de 4 km. Nas fibras monomodo, a radiação pode ter o comprimento de onda de 1.310 nm ou 1.550 nm.



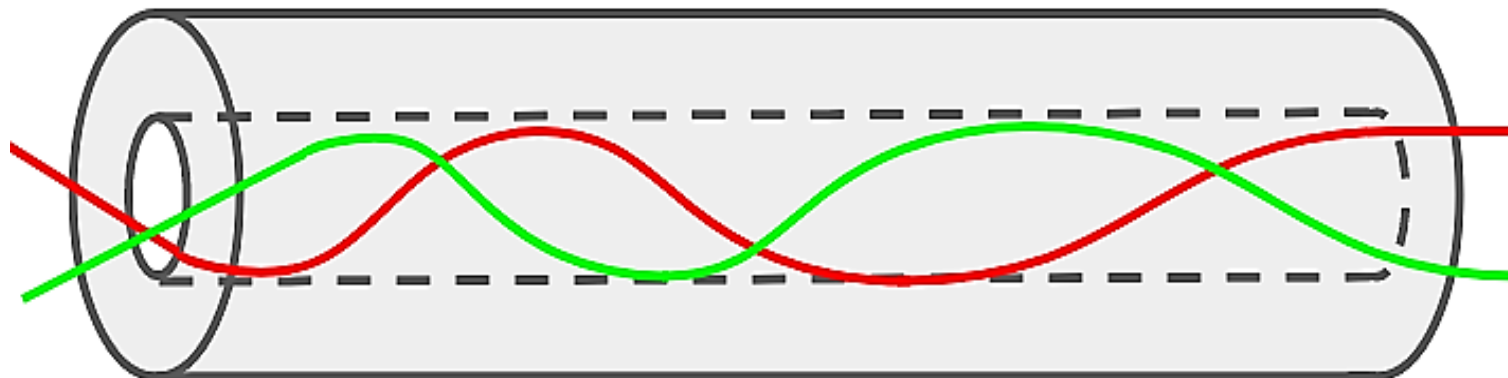
Tipos de fibras

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



Tipos de fibras

- 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. O diâmetro do núcleo nesse tipo de fibra é de 50 μm a 200 μm .



Tipos de fibras

- 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, s/d), enquanto as fibras multimodo *graded index* são usadas para transmissões a média distância (de 10 a 20 km) e para velocidades elevadas de transmissão (34-140 Mb/s, FS, s/d). A performance das fibras multimodo *graded index* é melhor do que a performance das *step index*, mas o seu custo é maior.
 - Segundo a norma TIA-598-C, os cabos de fibra óptica monomodo têm a capa amarela, e os cabos multimodo têm a capa azul. No Brasil, a norma ABNT NBR 14566 define as cores para a identificação da fibra e das unidades básicas de cada cabo, conforme o quadro a seguir. A correta identificação das fibras é fundamental no processo de soldagem de dois cabos de fibra óptica.

Tipos de fibras

Código de cor para a 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 de 1 a 12.
Fonte: Furukawa Electric [s.d.] *apud* ABNT (2020a).

Vantagens e desvantagens no uso de fibras

- As fibras ópticas usam luz para transmitir a 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 o seu material não seja afetado por reagentes nem por corrosão, como ocorreria com os cabos metálicos. Assim, as 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.
 - 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.

Interatividade

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). Determine a abertura numérica (NA) para essa fibra.

- a) $9,3^\circ$.
- b) $18,5^\circ$.
- c) $45,4^\circ$.
- d) $62,3^\circ$.
- e) $88,1^\circ$.

Resposta

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). Determine a abertura numérica (NA) para essa fibra.

- a) 9,3°.
- b) 18,5°.
- c) 45,4°.
- d) 62,3°.
- e) 88,1°.

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

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

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

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

$$NA = \sqrt{0,16}$$

- 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°.

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:

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

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

A onda resultante é calculada pelo princípio da superposição:

$$y = y_1 + y_2$$

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

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

Superposição de ondas

Exemplo: 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:

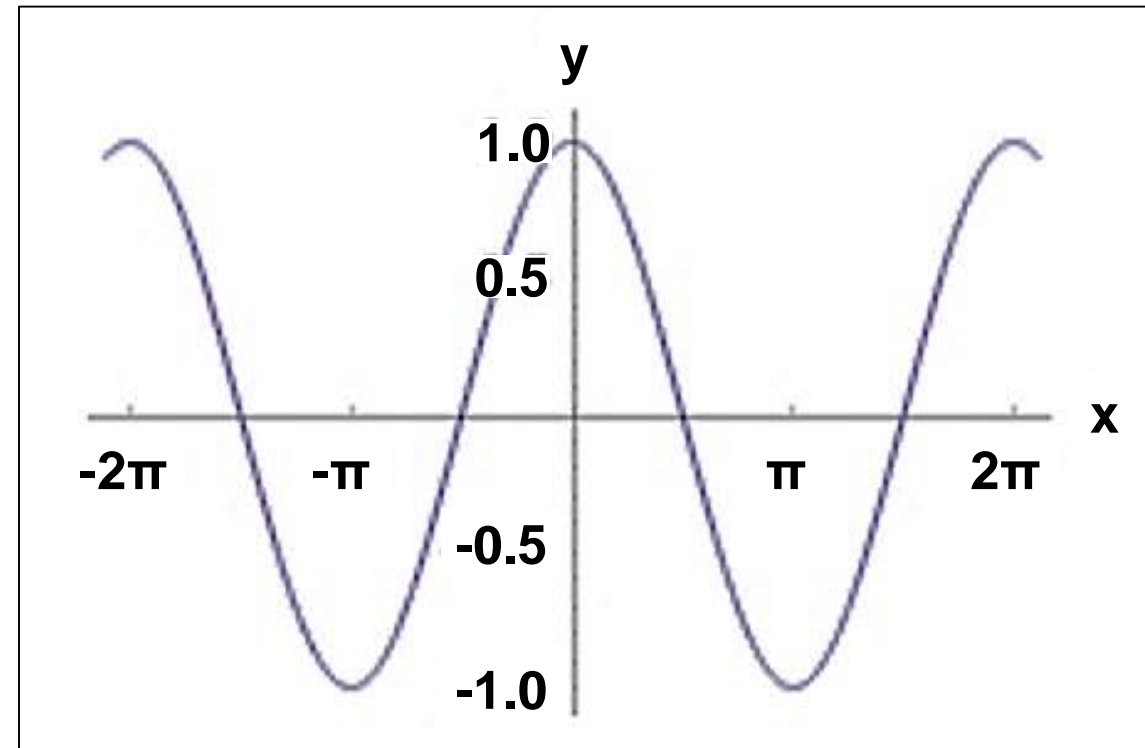
$$y = 2A \cdot \cos\left(\frac{\delta}{2}\right) \cdot \cos\left(kx - \omega \cdot t + \frac{\delta}{2}\right)$$

- 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:

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

Superposição de ondas

- 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 $A_{\text{sup.}}$ 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.



Superposição de ondas

- Então, a amplitude da onda resultante será maximizada quando:

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

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

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

$$\delta = 0$$

- Temos a amplitude máxima quando as ondas superpostas estão em fase. A amplitude, nesse caso, é igual a:

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

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

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

Superposição de ondas

- 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:

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

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

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

$$\delta = \pi$$

- Temos a amplitude mínima (em módulo) quando as ondas superpostas estão com uma diferença de fase de π :

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

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

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

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

Coerência

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

Coerência

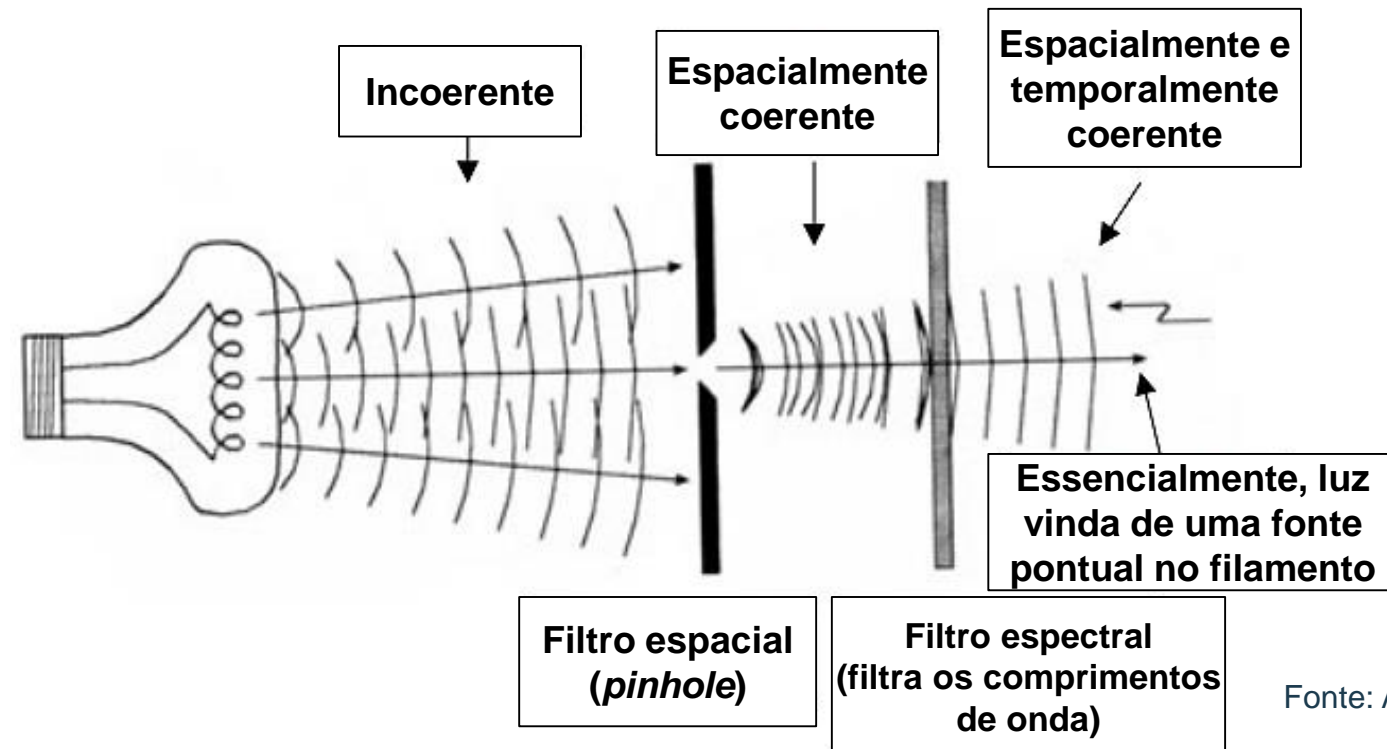
- O princípio de coerência aplica-se, da mesma forma, para as ondas mecânicas e para as ondas eletromagnéticas. Um exemplo de uma fonte de luz não coerente é a lâmpada incandescente, na qual as diferentes partes do filamento produzem radiações com fases independentes. Um exemplo de radiação coerente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

A coerência pode ser de dois tipos:

- Coerência espacial;
 - Coerência temporal.
- Na coerência temporal, deve haver uma 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 a radiação em um único comprimento de onda.

Coerência

- Na coerência espacial, deve haver uma 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 a 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.



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:

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

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

$$A_r = 2 \cdot A$$

Interferência

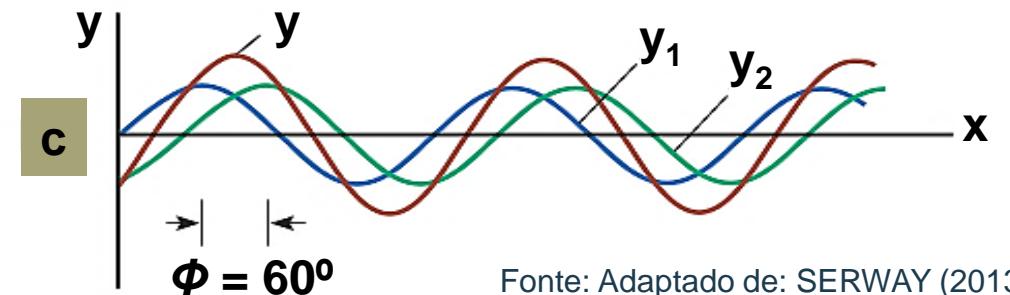
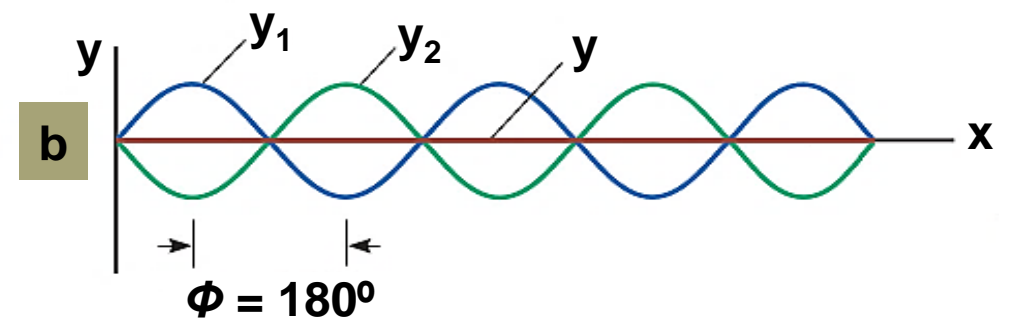
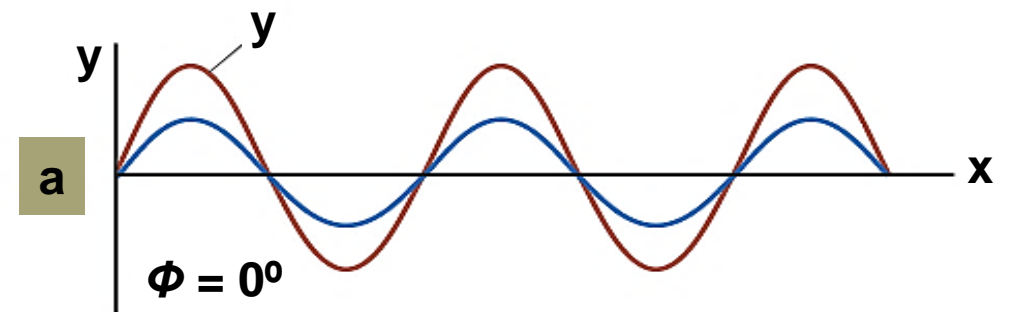
- Quando a diferença de fase entre as ondas é igual a π , o máximo de uma onda coincide com o mínimo da outra, de forma que a onda se aniquila. Nesse caso, temos o que chamamos de interferência destrutiva. Analisando a amplitude para tal situação, vemos que a amplitude é nula, como calculado a seguir:

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

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

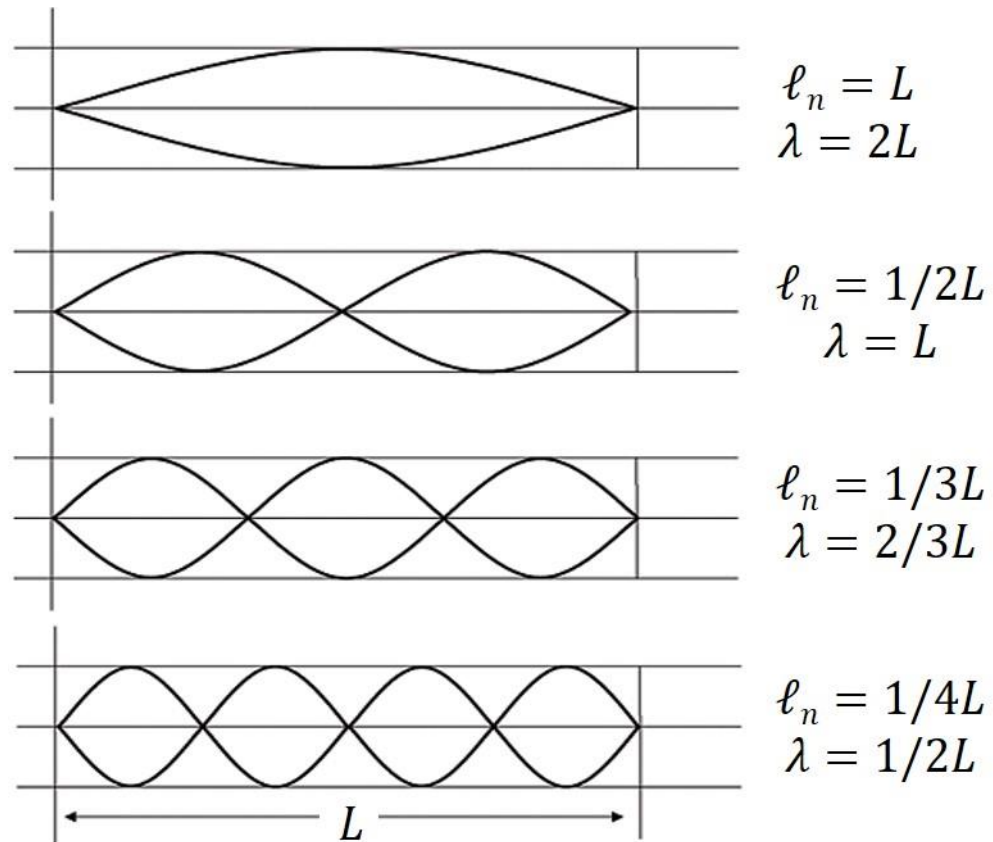
$$A_r = 2 \cdot A \cdot 0$$

$$A_r = 0$$



Interferência

- 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.



Interatividade

Determine a amplitude resultante devido à superposição de duas ondas de mesma amplitude de $A = 2$ m, mesma pulsação ω e mesmo número de onda k , com uma diferença de fase de $\pi/5$ rad.

- a) 0,80 m.
- b) 1,61 m.
- c) 3,23 m.
- d) 6,46 m.
- e) 2,35 m.

Resposta

Determine a amplitude resultante devido à superposição de duas ondas de mesma amplitude de $A = 2$ m, mesma pulsação ω e mesmo número de onda k , com uma diferença de fase de $\pi/5$ rad.

- a) 0,80 m.
- b) 1,61 m.
- c) 3,23 m.
- d) 6,46 m.
- e) 2,35 m.

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

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

- $A = 2 \cdot 2 \cdot \cos((\pi/5)/2).$

Referências

- GALLAS, M. R. *Coerência*. [s.d.]. Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/~marcia/coerencia.pdf>. Acesso em: 04 nov. 2020.
- GUIA ESTUDO. *Refração*. [s.d.]. Disponível em: <https://www.guiaestudo.com.br/refracao>. Acesso em: 28 out. 2020.
- 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: 04 nov. 2020.
- KUANG, S. C.; CANTWELL, W. J. The use of plastic optical fibre sensors for monitoring the dynamic response of fibre composite beams. *Meas. Sci. Technol.* v. 14, 2003.
 - SERWAY, R. A.; JEWETT JR., J. W. *Physics for scientists and engineers*. 9. ed. Stamford: Cengage Learning, 2013. p. 1065.

Referências

- 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.
- YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. *Física IV: ótica e física moderna*. 12. ed. São Paulo: Addison Wesley, 2006.

ATÉ A PRÓXIMA!