

## DESCRIÇÃO

Fundamentos da ondulatória e sua aplicação no processo de audição e visão do corpo humano.

## PROPÓSITO

Compreender as bases da ondulatória, a área da Física que estuda os fenômenos ondulatórios, para aplicar o conhecimento no entendimento dos processos de audição e visão do corpo humano.

## OBJETIVOS

# MÓDULO 1

Descrever os fundamentos da ondulatória

# MÓDULO 2

Relacionar os conhecimentos de ondas sonoras com o mecanismo neural da audição

# MÓDULO 3

Relacionar os conhecimentos sobre as radiações visíveis com o mecanismo neural da visão

## INTRODUÇÃO

No Universo, diversos tipos de energia se propagam através de ondas mecânicas (vibração), ondas sonoras, ondas eletromagnéticas etc. O nosso corpo é capaz de perceber esses diversos tipos de vibração e interpretá-los de maneira adequada por meio do nosso sistema nervoso central. Diversas vias sensoriais são capazes de detectar essas ondas, provocando uma transdução desse sinal em um impulso nervoso que possa ser processado pelos centros superiores do encéfalo.

Dois exemplos dessa atuação de nosso sistema nervoso são a audição e a visão. Na **audição**, um conjunto de ossículos, juntamente com uma membrana (o tímpano), recebe a vibração sonora (um tipo de vibração mecânica) e transmite ao cérebro (lobo temporal) a informação de intensidade e frequência, através de impulsos nervosos. Já na **visão**, os olhos têm o papel de receber a luz visível (uma onda eletromagnética), transformando-a em impulso nervoso que se propagará até nosso lobo occipital no cérebro.

A Biofísica tem uma grande importância no esclarecimento desse fenômeno. Sendo assim, iremos abordar fundamentos básicos de ondulatória, uma área da Física, para então

entendermos como se processa o sentido da audição. Em um segundo momento, abordaremos as radiações visíveis, para que possamos entender como ocorre o sentido da visão.

# MÓDULO 1

---

⦿ Descrever os fundamentos de ondulatória

## CONCEITOS BÁSICOS

Ondulatória é a área da Física que estuda os fenômenos ondulatórios. Ondas são movimentos oscilatórios se propagando em um meio, transferindo energia (ou seja, não há transferência de matéria).

Na natureza, é fácil identificarmos esse tipo de fenômeno. Por exemplo, quando uma pedra cai nas águas tranquilas de um lago, observamos um trem de ondas se formando a partir do ponto onde a pedra tocou a água. Quando balançamos para cima e para baixo uma corda com uma extremidade presa, são produzidas ondas senoidais com amplitudes proporcionais à nossa força. Na música, as cordas de um instrumento musical, ao serem vibradas, irão gerar ondas que, dependendo de suas frequências, emitirão sons que chamamos de notas musicais. Cada nota musical é um som em determinada frequência.

**Podemos identificar dois tipos de ondas:**

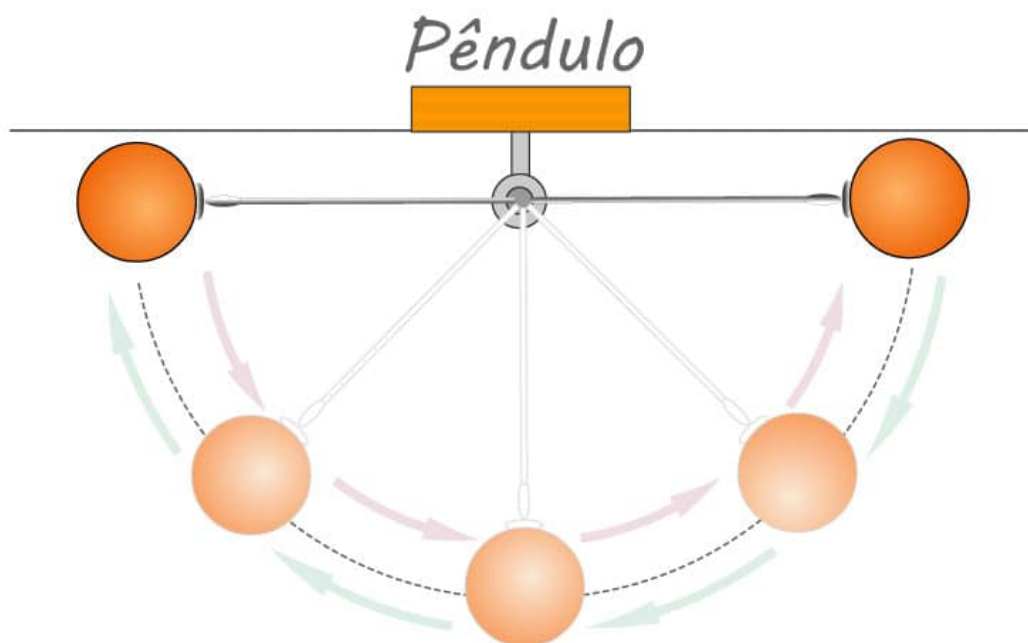
## MECÂNICAS

Necessitam de matéria para se propagarem, pois são deformações provocadas em um meio.

## ELETROMAGNÉTICAS

Não necessitam da matéria, ou seja, podem se propagar no vácuo. Na verdade, elas são a vibração de cargas elétricas.

Dizemos que um movimento é periódico quando a situação considerada se repete em intervalos ou períodos de tempo iguais. Por exemplo, um pêndulo consiste em um corpo ou partícula ao final de um fio ideal de comprimento, que produz o **movimento harmônico simples** (MHS). Esse corpo se movimenta de maneira periódica e oscilatória.



Fonte: grayjay/Shutterstock.

📷 O pêndulo.



Fonte: Keattikorn/Shutterstock.

📷 Trem de ondas gerado na água ao cair um objeto.

Uma das brincadeiras que crianças adoram fazer em um parque, ou na piscina, é jogar objetos dentro da água, gerando uma sequência de ondas periódicas a partir do ponto de toque que se

propaga com a mesma velocidade. Esse trem de ondas possui um movimento que consideramos como uma **curva senoide** (ou cossenoide).

Quando falamos de movimento periódico, podemos definir dois importantes parâmetros que serão usados ao longo de nosso estudo: **o período ( $T$ ) e a frequência ( $f$ )**.

**Período** é o tempo gasto para uma repetição do fenômeno.

**Frequência** representa quantas vezes o fenômeno ocorre por unidade de tempo.

Para entendermos melhor, vamos imaginar uma situação fictícia: no telhado de sua casa, durante um dia de chuva, você consegue observar uma goteira molhando o chão. Você percebe que as gotas caem de modo periódico, ou seja, sempre no mesmo intervalo de tempo. Com sua curiosidade aguçada, você usa um cronômetro e mede o tempo que leva entre uma gota e outra, e encontra o valor de 2 segundos. Portanto, o período ( $T$ ) vale 2 segundos. E a frequência? Bem, existe uma relação muito fácil de aprendermos entre frequência e período:

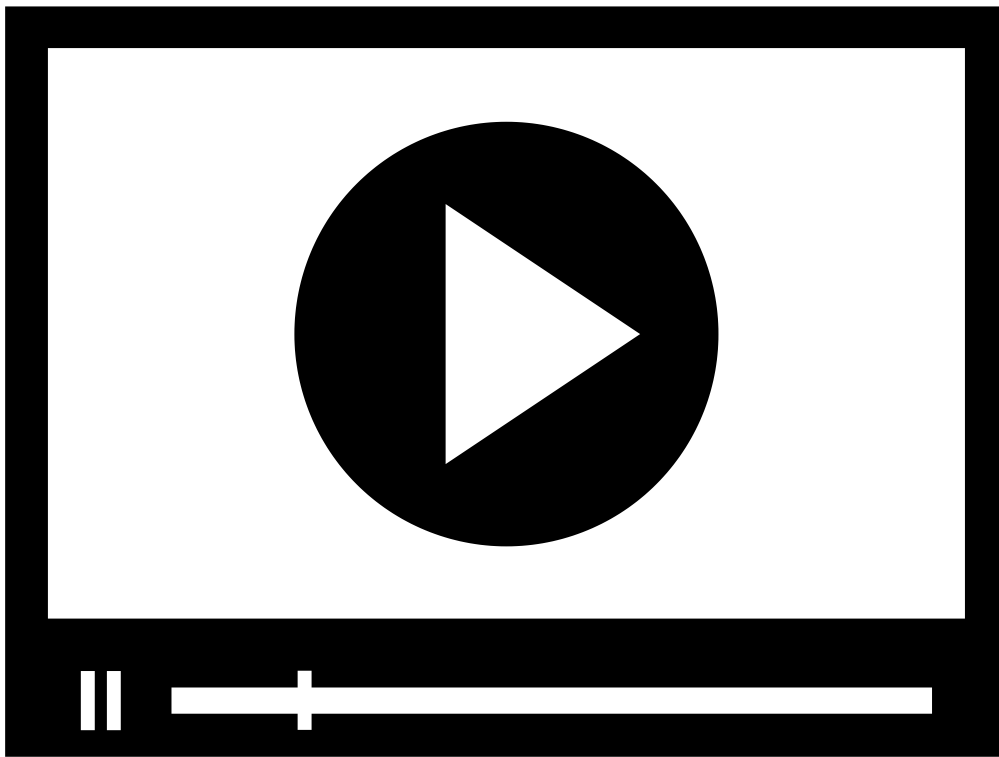
**$T =$**

**Atenção!** Para visualização completa da equação utilize a rolagem horizontal

Concluimos que o período é o inverso da frequência, e vice-versa. Portanto, se o período da goteira é 2 segundos, basta fazermos o inverso ( $1/2$ ), e então encontraremos o resultado de 0,5 hertz (Hz).

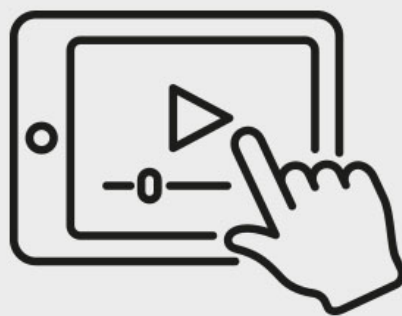
**Hertz** - Unidade de frequência que significa eventos ou ciclos a cada segundo.

Sendo assim, quando falamos que a goteira tem frequência de 0,5 Hz, significa dizer que, a cada segundo, cai meia gota (ou, a cada dois segundos, uma gota)!



## CONHECENDO MELHOR OS CONCEITOS SOBRE A ONDULATÓRIA

Para assistir a um vídeo sobre o assunto, acesse a versão online deste conteúdo.



Quando falamos das ondas, o raciocínio é semelhante. Se tivermos uma onda sonora, por exemplo, com 20.000 Hz de frequência, isso quer dizer que a cada segundo ela faz 20.000 ciclos de onda (um ciclo de onda é representado pela distância entre dois picos da onda, ou dois vales). A frequência da radiação vermelha visível é de  $4,6 \times 10^{14}$  Hz!

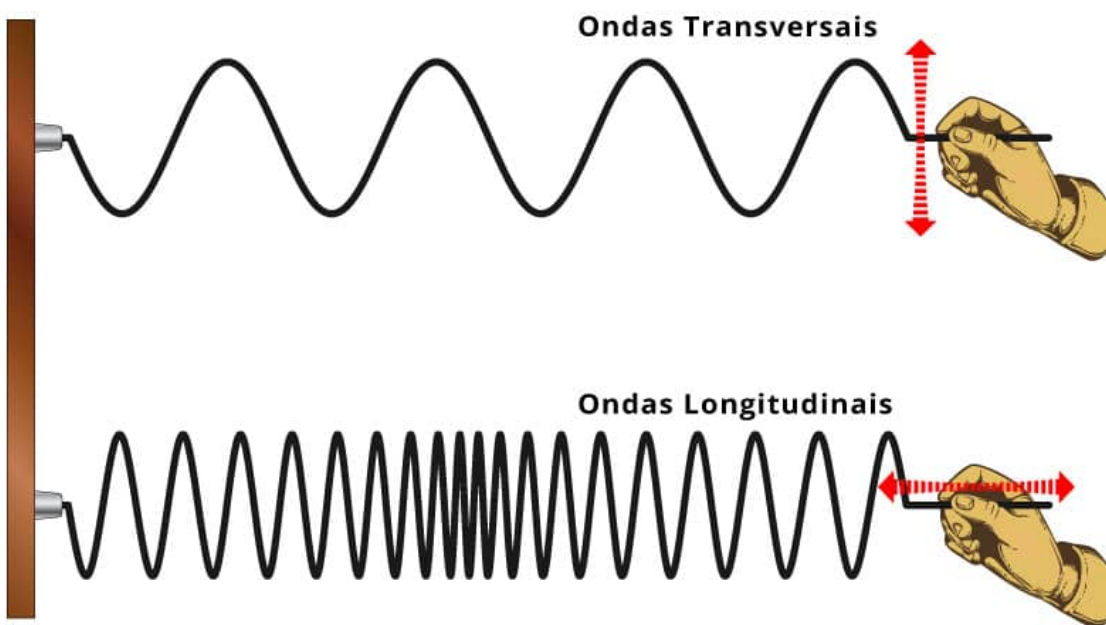
**As ondas podem ser classificadas em longitudinais e transversais.**

# ONDAS LONGITUDINAIS

A direção do movimento das partículas do meio é a mesma da direção da propagação.

# ONDAS TRANSVERSAIS

A direção do movimento das partículas do meio é perpendicular à da propagação.



Fonte: Fouad A. Saad/Shutterstock.

📷 As ondas transversais e longitudinais.

Há ainda outra classificação em relação à direção de propagação da onda:

# ONDAS UNIDIMENSIONAIS

Se propagam em apenas uma direção (exemplo: a onda em uma corda que balança).

# ONDAS BIDIMENSIONAIS

Se propagam em duas direções (exemplo: a onda gerada quando um objeto cai na superfície da água).

## ONDAS TRIDIMENSIONAIS

Se propagam em todas as direções possíveis (exemplo: as ondas sonoras e visíveis).

Considerando uma onda periódica, como a mostrada na figura, podemos identificar alguns parâmetros importantes que caracterizam o fenômeno ondulatório. Um deles é o **comprimento de onda ( $\lambda$ )**, que é a distância entre dois picos ou cristas (ou dois vales).

A distância entre uma crista e um vale é de meio comprimento de onda, ou  $\lambda/2$ . O **pico (ou crista)** é o ponto mais alto da onda, e o **vale** o ponto mais baixo. A **amplitude** da onda é a distância vertical entre a posição de equilíbrio e o pico (ou vale). Pela Equação Fundamental das Ondas, podemos calcular a velocidade de propagação da onda ( $v$ ):

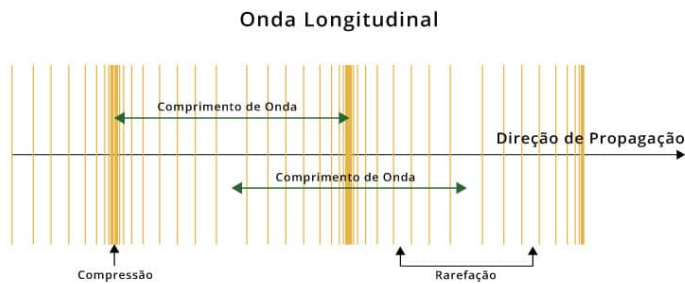
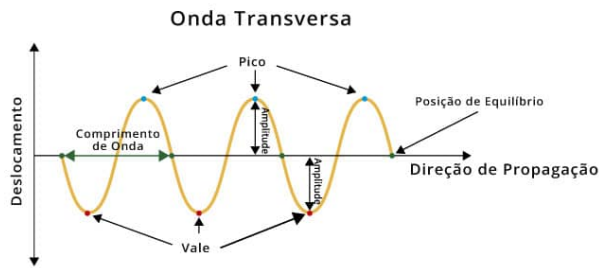
$$v = \lambda \cdot f$$

**Atenção!** Para visualização completa da equação utilize a rolagem horizontal

Onde  $f$  é a frequência da onda (em Hz).



## Formas de Ondas

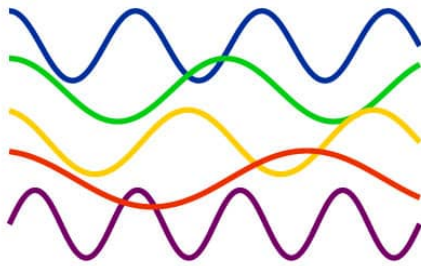


Fonte: Steve Cymro/Shutterstock.

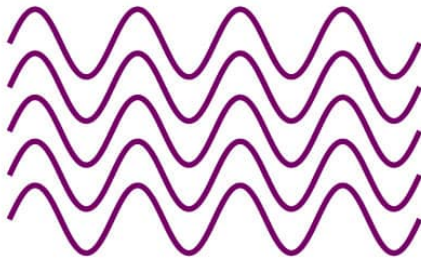
📷 Parâmetros das ondas transversais e longitudinais.

## 📢 ATENÇÃO

Dizemos que duas ondas estão em fase (ou concordância de fase, ou coerentes) quando realizam o movimento ondulatório “juntas”, ou seja, com a mesma velocidade e o mesmo deslocamento das partículas. Quando as ondas não estão em fase, dizemos que estão “defasadas”, ou com diferença de fase (ou incoerentes).



Incoerentes (defasadas)



Coerentes (em fase)

Fonte: Dn Br/Shutterstock.

📷 Fases de onda do tipo coerente e incoerente.

## FENÔMENOS ONDULATÓRIOS

Todas as ondas, sejam mecânicas sejam eletromagnéticas, sofrem influência da matéria.

Quando estão se propagando em um meio e encontram uma interface (limite, fronteira) de outro meio, podem ser refletidas, absorvidas, ou mesmo passar para o outro meio, desviando o sentido da direção de propagação.

A estes fenômenos damos o nome de fenômenos ondulatórios. São eles (FUKE; SHIGEKIYO; YAMAMOTO, 1999):

**REFLEXÃO**

**REFRAÇÃO**

**DIFRAÇÃO**

**POLARIZAÇÃO**

**INTERFERÊNCIA**

Quando uma onda que está se propagando em um meio, encontra a interface de outro meio (onda incidente) e retorna ao meio original (onda refletida), mantendo suas características.

Quando uma onda, que está se propagando em um meio, encontra a interface de outro meio (onda incidente) e passa para o outro meio (onda refratada). A onda refratada poderá alterar sua direção de propagação e velocidade, mas mantém a frequência constante.

Quando a onda consegue contornar um obstáculo.

Quando uma onda transversal, que está se propagando em várias direções, passa a se propagar em apenas uma direção.

Quando duas ondas, ao se encontrarem, se superpõem uma em relação à outra.

Sobre esses fenômenos, iremos abordá-los à medida que falarmos sobre as ondas sonoras e as ondas visíveis, nos próximos módulos.

## **VERIFICANDO O APRENDIZADO**

**1. UM PROFESSOR DE EXAMES DIAGNÓSTICOS ESTÁ EXPLICANDO COMO O ULTRASSOM FUNCIONA. ELE DIZ QUE AS VIBRAÇÕES SÃO PRODUZIDAS POR UM FENÔMENO DENOMINADO PIEZOELETRICIDADE, NO QUAL UM ELEMENTO, AO RECEBER UMA VOLTAGEM ELÉTRICA, PRODUZ UMA VIBRAÇÃO MECÂNICA, OU SEJA, ATUA COMO UM TRANSDUTOR DE ENERGIA. EM UM DADO MOMENTO, ELE MENCIONA QUE, NA FISIOTERAPIA, É MUITO USADA A ESTIMULAÇÃO COM UMA FREQUÊNCIA DE ONDA DE 1 MHZ (MEGAHERTZ), OU SEJA, 1 MILHÃO DE HERTZ. UMA VEZ QUE VOCÊ É UM ALUNO DA DISCIPLINA BIOFÍSICA, VOCÊ IRÁ CONCLUIR QUE O ULTRASSOM A 1 MHZ:**

- A) Produz 1 milhão de oscilações por segundo.**
- B) Produz 1 milhão de oscilações por minuto.**
- C) Produz 1 oscilação por minuto.**
- D) Produz 1 bilhão de oscilações por minuto.**

E) Produz 1 bilhão de oscilações por segundo.

**2. UMA ONDA MECÂNICA OSCILA COM UMA VELOCIDADE DE 100 M/S. SABENDO QUE O COMPRIMENTO DE ONDA (OU SEJA, DISTÂNCIA ENTRE DUAS CRISTAS, OU DE UM VALE A OUTRO) VALE 1 M, A FREQUÊNCIA, EM HERTZ, CALCULADA PELA EQUAÇÃO FUNDAMENTAL DA ONDA, SERÁ DE:**

- A) 10 Hz
- B) 101 Hz
- C) 99 Hz
- D) 100 Hz
- E) 110 Hz

---

## **GABARITO**

1. Um professor de exames diagnósticos está explicando como o ultrassom funciona. Ele diz que as vibrações são produzidas por um fenômeno denominado piezoeletricidade, no qual um elemento, ao receber uma voltagem elétrica, produz uma vibração mecânica, ou seja, atua como um transdutor de energia. Em um dado momento, ele menciona que, na Fisioterapia, é muito usada a estimulação com uma frequência de onda de 1 MHz (Megahertz), ou seja, 1 milhão de hertz. Uma vez que você é um aluno da disciplina Biofísica, você irá concluir que o ultrassom a 1 MHz:

A alternativa "A " está correta.

Hertz significa uma oscilação por segundo. No caso de 1 MHz, ou seja, 1.000.000 Hz, temos 1.000.000 de oscilações a cada segundo.

2. Uma onda mecânica oscila com uma velocidade de 100 m/s. Sabendo que o comprimento de onda (ou seja, distância entre duas cristas, ou de um vale a outro) vale 1 m, a frequência, em hertz, calculada pela Equação Fundamental da Onda, será de:

A alternativa "D " está correta.

A Equação Fundamental da Onda diz que a frequência da onda será a velocidade dela (m/s) dividida pelo seu comprimento de onda (m). Logo, ao realizarmos o cálculo, teremos:  $f = 100/1 = 100 \text{ Hz}$ .

## MÓDULO 2

---

- ⦿ Relacionar os conhecimentos de ondas sonoras com o mecanismo neural da audição

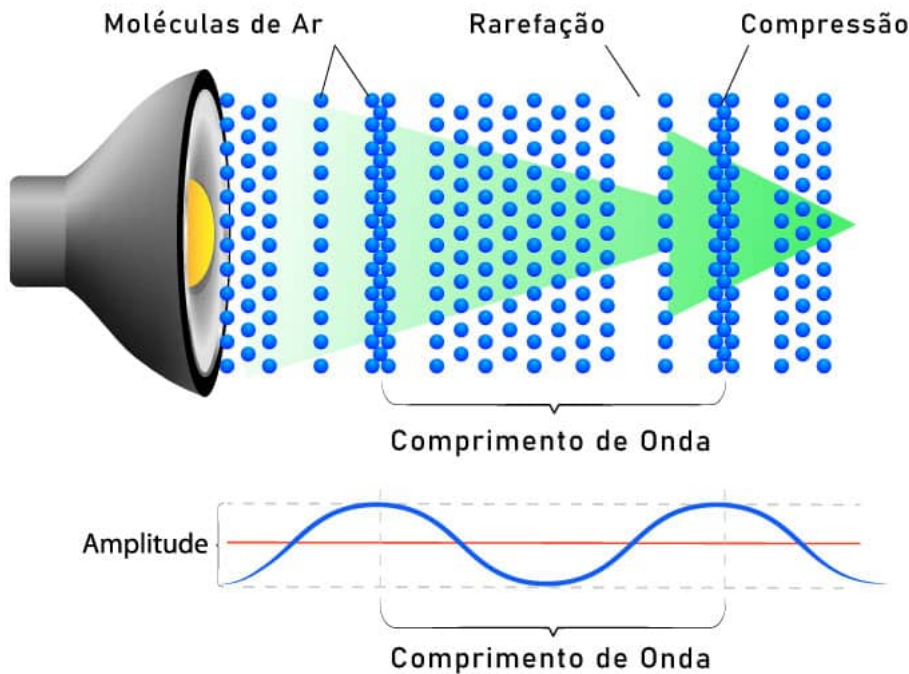
## CONSIDERAÇÕES BÁSICAS DE ACÚSTICA

### ATENÇÃO

Acústica é a área da Física que estuda as ondas sonoras. Uma onda sonora é uma onda mecânica tridimensional (se propaga nas três dimensões) que se propaga em um meio material elástico. Portanto, as ondas sonoras não se propagam no vácuo, uma vez que é um espaço com ausência de matéria.

As ondas sonoras se propagam por ciclos de rarefação e compressão. O movimento das partículas exibe um **padrão sinusoide**, ou seja, de uma onda senoide, na qual as cristas são as compressões e os vales, as rarefações.

# ONDAS SONORAS



Fonte: Designua/Shutterstock.

O ouvido do ser humano capta frequências de ondas sonoras de 20 a 20.000 Hz (ou 20 kHz). O som na realidade é a faixa de frequências das ondas sonoras captada pelo tímpano (uma membrana localizada em nosso ouvido interno), que transforma essa energia mecânica em impulsos nervosos, os quais são enviados para o processamento no córtex temporal do cérebro (o que chamamos de audição).

Frequências abaixo de 20 Hz são chamadas de **infrassom**, e frequências acima de 20 kHz são chamadas de **ultrassom**.

Segundo Haines (2002), uma faixa de frequência normal na qual nosso ouvido consegue captar as ondas sonoras vai de 50 a 16.000 Hz. A maioria das conversas entre os seres humanos ocorre com ondas na faixa de frequências de 100 a 8.000 Hz, sendo que a parte mais sensível está na faixa de 1.000 a 3.000 Hz. Quando ficamos expostos a um barulho muito intenso, nosso ouvido consegue seletivamente reduzir algumas frequências, para evitar danos maiores.

## ATENÇÃO

Dependendo do meio, o som propaga em diversas velocidades. A velocidade de propagação do som nos sólidos é maior do que a de propagação nos líquidos, e que é maior que nos

gases.

Em geral, a força de ligação entre as partículas é mais forte em materiais sólidos e mais fraca no estado gasoso. Veja na tabela abaixo alguns valores de velocidades do som (NDT, 2020):

Meio de propagação	Velocidade (m/s)
Borracha	60
Ar a 40 <sup>0</sup> C	355
Ar a 20 <sup>0</sup> C	343
Chumbo	1.210
Ouro	3.240
Vidro	4.540
Cobre	4.600
Alumínio	6.320

**Atenção!** Para visualização completa da tabela utilize a rolagem horizontal

Perceba que materiais rígidos e densos, como alumínio e cobre, têm velocidades de propagação altas, enquanto o som se propaga a uma velocidade baixíssima na borracha.

A velocidade do som pode ser encontrada usando a relação (MACHADO, 2013):

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

**Atenção!** Para visualização completa da equação utilize a rolagem horizontal

Onde **E é o módulo de Young**, que representa a rigidez do material (relacionado às propriedades elásticas do material), e  **$\rho$  é a densidade do material**. As propriedades elásticas referem-se à tendência de um material em manter sua forma e não deformar quando uma força é aplicada a ele. Um material como o aço sofrerá uma deformação menor do que a borracha quando uma força for aplicada aos materiais.

Pela equação, também observamos que a densidade do meio afeta a velocidade do som. A densidade descreve a massa de uma substância por volume. Uma substância que é mais densa por volume tem mais massa por volume. Normalmente, as moléculas maiores têm mais massa. Se um material for mais denso porque suas moléculas são maiores, ele transmitirá o som mais lentamente (NDT, 2020).

A **impedância acústica (Z)** representa a resistência de um material à passagem do som. Cada material possui um valor de Z, que pode ser estimado pela relação (FISH, 1990):

$$Z = \rho \cdot v$$

**Atenção!** Para visualização completa da equação utilize a rolagem horizontal

Onde  **$\rho$  é a densidade do material**, e  **$v$  é a velocidade longitudinal** do som no mesmo material.

Percebe-se que materiais mais densos possuem impedância acústica maior. Esse fato tem sua relevância no estudo da Acústica, uma vez que a reflexão e a refração que uma onda sonora pode sofrer dependem da impedância acústica entre os dois meios que estão separados pela interface de reflexão ou refração. Quanto maior a diferença de impedância entre dois meios, maior será a reflexão e, portanto, menor será a refração ou transmissão da onda para o outro meio.

## ★ EXEMPLO



Vamos comparar o encontro de um som viajando no ar com um meio líquido (uma piscina) e com um meio sólido (uma parede). A diferença de impedância entre ar e água é bem menor do que entre ar e concreto. Portanto, o som será mais refletido na parede (e pouca energia sonora passará). No caso da piscina, menos energia será refletida (consequentemente, mais energia será transmitida para o meio líquido).

Podemos perceber a relação da quantidade de **reflexão (R)** e de **transmissão (T)** da onda com respeito às impedâncias acústicas dos meios 1 e meio 2 usando as seguintes equações:

$$R = \frac{I_r}{I_i} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}$$

**Atenção!** Para visualização completa da equação utilize a rolagem horizontal

$$T = \frac{I_t}{I_i} = \frac{2 \cdot Z_2}{Z_2 + Z_1}$$

**Atenção!** Para visualização completa da equação utilize a rolagem horizontal

Onde  $I_r$ ,  $I_i$  e  $I_t$  são, respectivamente, as **intensidades das ondas refletida, incidente e transmitida**, em relação à interface entre os meios 1 e 2.

**O som também possui características peculiares.**

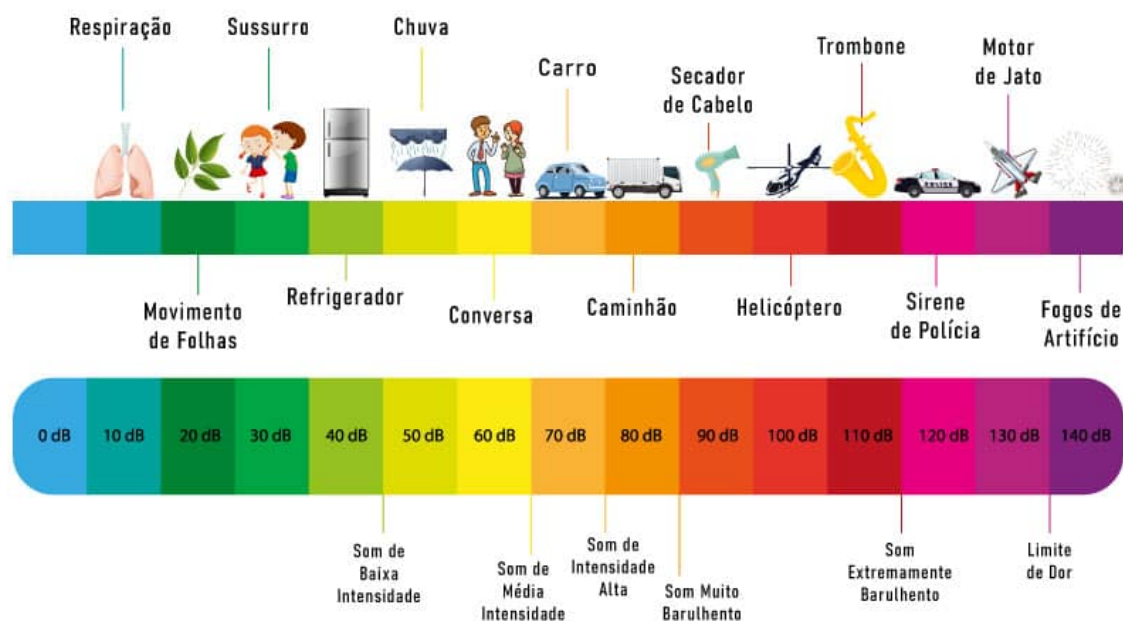
## ALTURA

Sons com frequências altas são chamados de agudos; do contrário, sons com frequências baixas são chamados de graves.

## INTENSIDADE

Define o som forte (muita energia) e o som fraco (pouca energia), geralmente medida em decibéis (dB).

Veja a figura seguinte, que demonstra as intensidades sonoras em diversas situações. Um aumento de dez vezes na energia é chamado de **1 bel**; quando dizemos que houve um aumento de 0,1 bel, chamamos de **1 decibel (1 dB)**.



Fonte: Emir Kaan/Shutterstock.

#### 📷 Intensidades de ondas sonoras.

O excesso na intensidade sonora pode trazer grandes danos. Segundo Rui (2007), a Legislação Brasileira, na Norma Regulamentadora no 15 do Ministério do Trabalho (Portaria 3214/78), estabelece os limites de tolerância para ruídos contínuos ou intermitentes (com equipamento de proteção), como 85 dB para uma exposição máxima de 8 horas por dia e 115 dB para uma exposição máxima de 7 minutos por dia. Segundo a autora, uma exposição contínua a ruídos superiores a 85 dB pode causar perdas permanentes de audição. Podemos definir também intensidade como a relação:

$$I = \frac{E}{A \cdot \Delta t}$$

**Atenção!** Para visualização completa da equação utilize a rolagem horizontal

Onde  **$E$**  é a **energia sonora**, atravessando uma área  **$A$** , em determinado tempo  **$\Delta t$** . Como sabemos que  **$E/\Delta t$**  equivale à potência ( **$P$** ), podemos então escrever que:

$$I = \frac{P}{A}$$

**Atenção!** Para visualização completa da equação utilize a rolagem horizontal

Intensidade é dada por  $\text{W/m}^2$ . O limiar audível, ou seja, a intensidade mínima de energia sonora que um ser humano consegue ouvir é de  $10^{-12} \text{ W/m}^2$ . O limiar de dor, ou seja, o máximo que uma pessoa consegue ouvir (sem causar dor) é de  $1 \text{ W/m}^2$ .

Finalmente, o **timbre** é a qualidade do som que nos permite diferenciar as fontes sonoras. Uma mesma nota pode ser tocada por um piano e por um saxofone, por exemplo, no entanto, conseguimos diferenciar qual instrumento que tocou.

## ATENÇÃO

Um conceito importante é o de **frequência natural e ressonância**. Diversos sistemas físicos podem gerar uma onda sonora com determinada frequência quando vibram livremente. Essa frequência é chamada de frequência natural do material.

Um exemplo muito conhecido pelos músicos é o de um objeto metálico chamado diapásão. Quando batemos nele, o objeto emite uma onda sonora na frequência de 440 Hz, ou seja, a nota Lá. Quando um material recebe uma energia externa com a mesma frequência natural, ele vibra com amplitudes maiores do que as normais: a esse fenômeno damos o nome de ressonância.



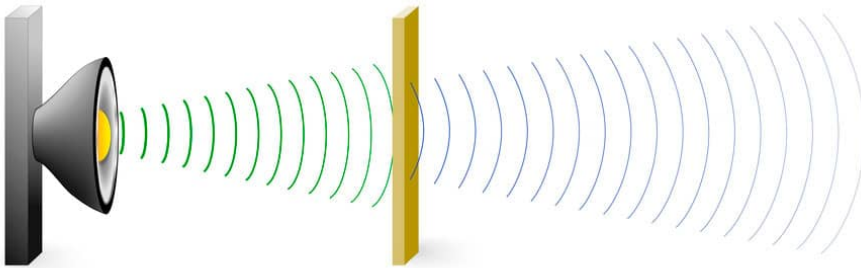
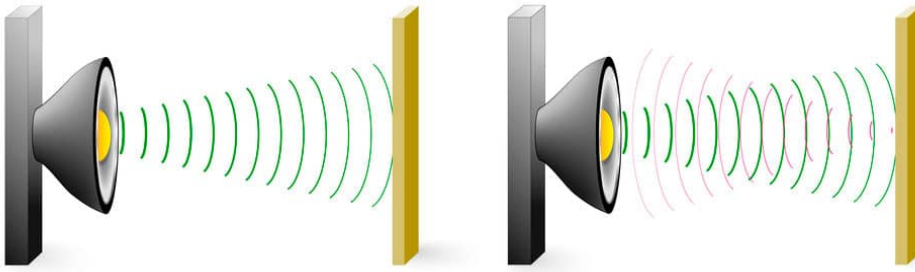
Fonte: peterschreiber.media/Shutterstock.

📷 Um diapasão.

## INTERAÇÃO DO SOM COM A MATÉRIA

As ondas sonoras podem sofrer reflexão, refração, difração, interferência e absorção.

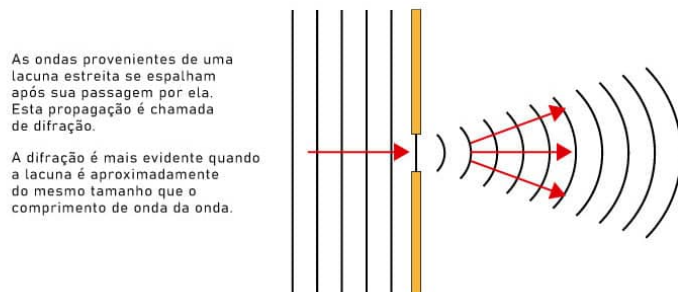
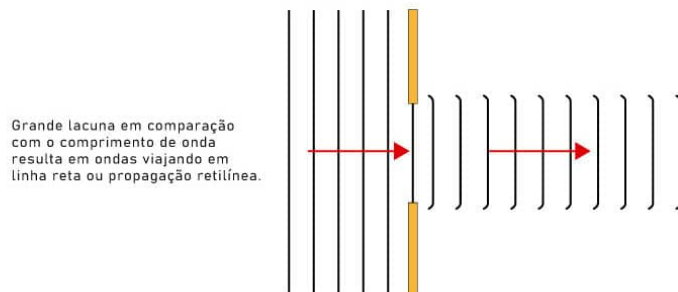
Na **reflexão**, a onda, ao incidir na interface entre dois meios, é refletida (o que chamamos de eco). Na **refração**, a onda é transmitida para o outro meio (por isso explicamos por que conseguimos ouvir uma música, por exemplo, sendo tocada em outro ambiente separado por paredes). Na **difração**, a onda sonora pode contornar obstáculos (ou aberturas), e esse fenômeno dependerá do comprimento de onda. Na **interferência**, duas ondas se superpõem, tendo um efeito de aumento da energia (no caso de interferência construtiva) ou diminuição de energia (interferência destrutiva). Finalmente, a onda sonora sofre **absorção** e espalhamento de sua energia durante sua propagação na matéria, o que chamamos de atenuação. Portanto, a intensidade da onda é reduzida. Isso explica a razão pela qual ouvimos um pouco mais baixo aquele som que o vizinho colocou com o volume “nas alturas”! Ou seja, a onda sonora sofreu uma redução da intensidade ao se propagar pelas paredes de sua casa!



Fonte: Designua/Shutterstock.

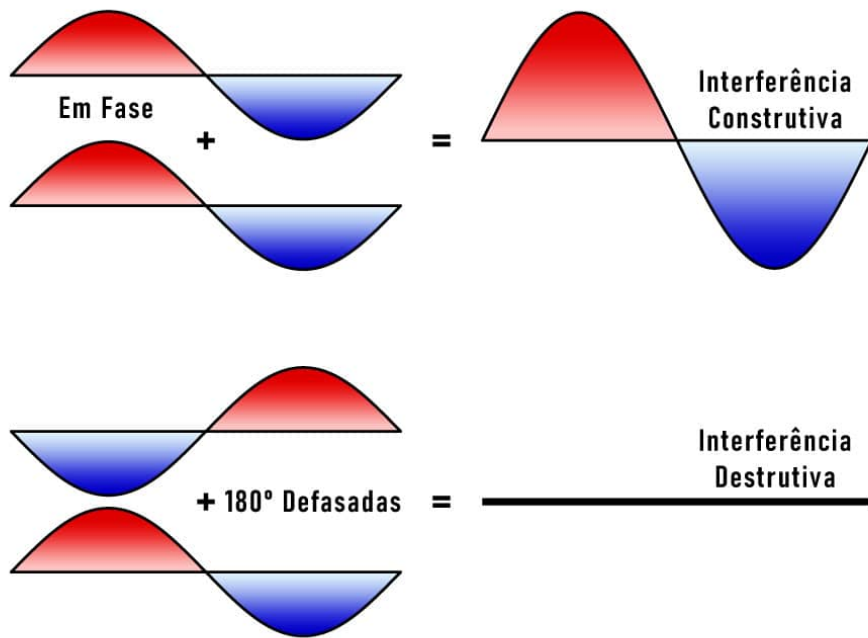
A reflexão e refração da onda sonora.

### Difração da Onda



Fonte: Steve Cymro/Shutterstock.

Fenômeno de difração da onda sonora.



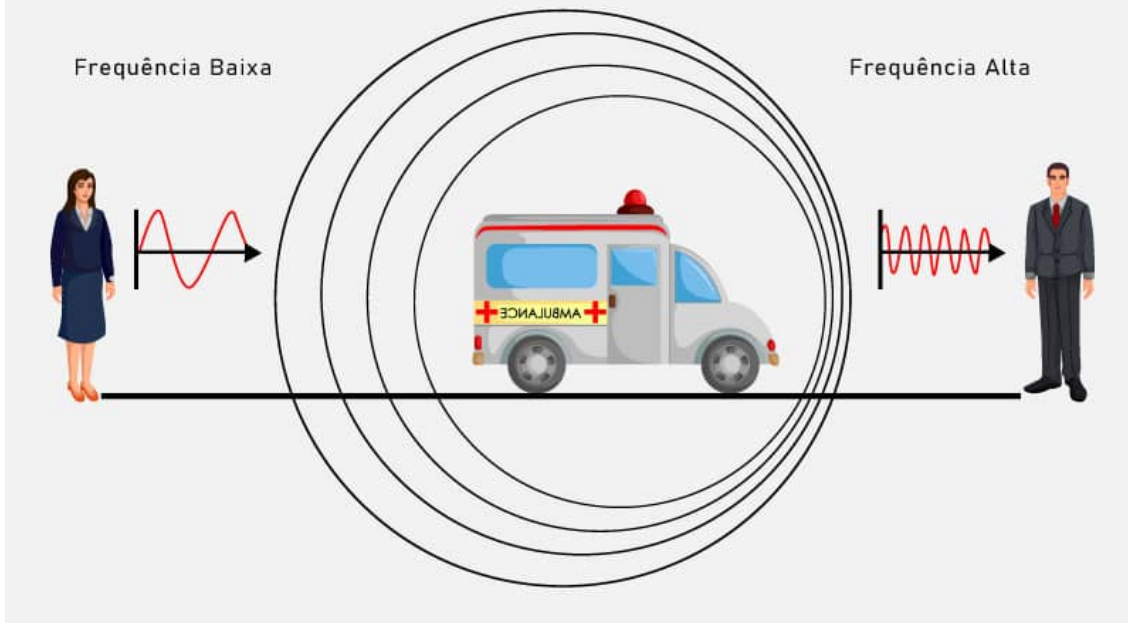
Fonte: Steve Cymro/Shutterstock.

O fenômeno de interferência nas ondas sonoras.

## EFEITO DOPPLER

Talvez você já tenha tido a seguinte sensação após a passagem de uma ambulância com a sirene ligada: quando o veículo se afasta, o som parece “mudar”, com frequência menor (mais grave). Isso se deve ao efeito Doppler, que consiste na mudança da frequência percebida do som devido ao movimento relativo entre observador e a fonte do som.

# Efeito Doppler



Fonte: Vecton/Shutterstock.

📷 O Efeito Doppler.

## SISTEMA AUDITIVO

O sistema auditivo é constituído por uma variedade de componentes que, juntos, formam um transdutor e amplificador de energia sonora em potenciais de ação, que serão enviados ao cérebro para processamento. Podemos dividir o ouvido em: **externo**, **médio** e **interno**.

### OUVIDO EXTERNO

É representado pela orelha e o conduto auditivo externo. Este último conecta a orelha ao ouvido médio, e termina internamente no tímpano (ou membrana timpânica).

### OUVIDO MÉDIO

É formado pelo sistema ossicular auditivo, que transmite a vibração para a cóclea: o martelo, e bigorna e o estribo.

## OUVIDO INTERNO

É composto pela cóclea. A tuba auditiva mantém o arejamento das cavidades da orelha média e provê o equilíbrio entre a pressão atmosférica e a do ar contido na cavidade timpânica.

O ouvido externo é semelhante a um tubo acústico fechado. Podemos calcular a frequência de ressonância ( $f_r$ ) nesses tubos usando a fórmula:

$$f_r = \frac{v}{4} \cdot L$$

**Atenção!** Para visualização completa da equação utilize a rolagem horizontal

Onde  **$L$**  é o comprimento do tubo. Se considerarmos a velocidade do som no ar de 348 m/s (GARCIA, 2002) e um comprimento de 2 a 3 cm do tubo, chegaremos a um valor de  $f_r$  que varia entre 2.900 a 4.350 Hz.

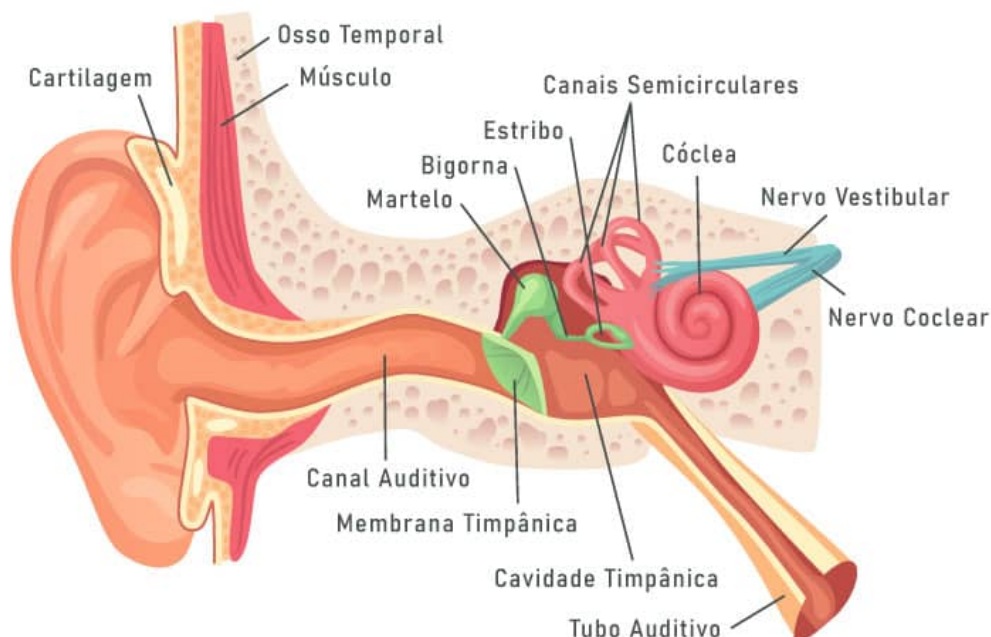
O grande desafio do aparelho auditivo é justamente levar as ondas sonoras no ambiente externo até o líquido (linfa) na cóclea, para a transdução do sinal auditivo. Sabe-se que apenas 0,1% da energia que entra pelo ouvido consegue sofrer refração e ser usada para a transdução.

O **tímpano** é uma membrana que vibra ao receber ondas sonoras provenientes do exterior do ouvido (canal acústico). Ele é heterogêneo e anisotrópico, ou seja, possui regiões diferentes quanto à massa. Isso faz com que essa membrana consiga emitir ondas em uma larga banda (espectro) de frequências.

O **martelo** está fixo ao tímpano pelo seu cabo e à bigorna pelo lado oposto. Por sua vez, a bigorna está articulada com o estribo (base do estribo). Finalmente, a placa do estribo está localizada na abertura (janela) oval do labirinto membranoso da cóclea.

O **músculo tensor do tímpano** fixa o cabo do martelo ao tímpano e tem um papel fundamental para manter a tensão da membrana e assim, permitir que ela vibre quando recebe ondas sonoras.





Fonte: Tartila/Shutterstock.

## 📷 O sistema auditivo.

As ondas que entram por nosso canal auditivo chegam à cóclea pela vibração do tímpano com o sistema ossicular. A articulação da bigorna com o estribo faz com que a placa do estribo realize movimentos para frente e para trás em relação à janela oval e, por sua vez, o líquido coclear, gerando compressões e rarefações no líquido.

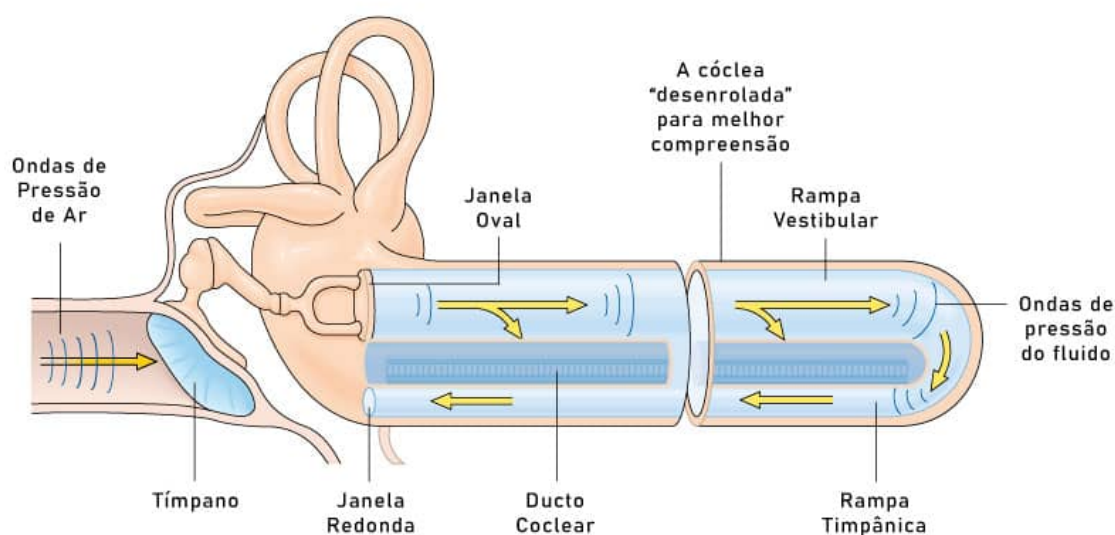
## 📢 ATENÇÃO

A superfície do tímpano é de aproximadamente  $55 \text{ mm}^2$ . Já a superfície da janela oval é de  $3,2 \text{ mm}^2$ . Ou seja, a área do tímpano é 17 vezes maior que a da janela oval. Se considerarmos o Princípio de Pascal, a pressão exercida sobre uma superfície pode ser calculada através da razão entre a força e a área. Considerando a força constante, quanto menor a área de contato, maior a pressão.

Essa diferença de superfície entre o tímpano e a janela oval faz com que haja uma amplificação do sinal na janela oval que segue pelo ouvido interno, especialmente até a cóclea, que fará o trabalho de transdução do sinal sonoro (ERROBIDART et al., 2014).

A cóclea é um sistema de 3 tubos espiralados: a rampa (ou escala) vestibular, a rampa (ou escala) média e a rampa (ou escala) timpânica. Nesses tubos, que estão encravados no osso temporal, circula linfa. As rampas vestibular e média são separadas pela chamada membrana

de Reissner; as rampas timpânica e média são separadas pela membrana basilar (que possui, por sua vez, os órgãos de Corti com células ciliadas sensíveis eletromecanicamente). Como a membrana de Reissner é muito fina, consideramos as rampas vestibular e média como uma única rampa. As vibrações do ar entram na rampa vestibular através dos movimentos da placa do estribo na janela oval.



Fonte: Emre Terim/Shutterstock.

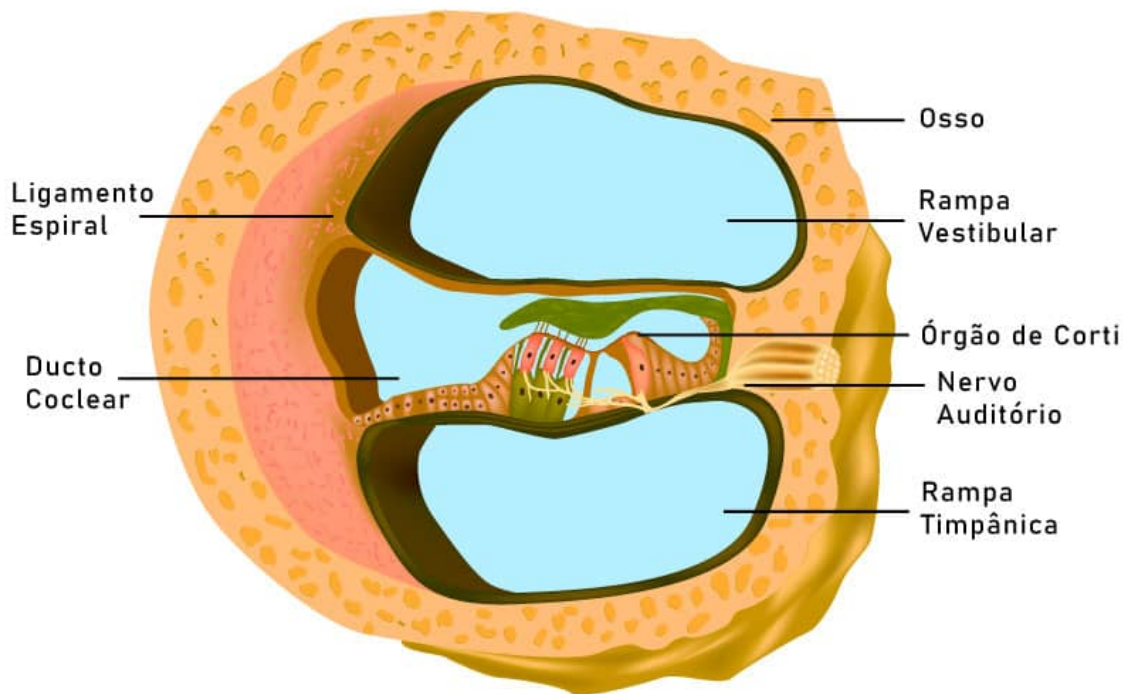
#### 📷 Rampas (ou escalas) da cóclea.

A membrana basilar, que separa as rampas timpânica e média, contém de 20.000 a 30.000 fibras basilares, projetadas do modíolo (o centro ósseo da cóclea) em direção à parede externa da cóclea. Essas fibras formam uma estrutura semelhante a “palhetas de uma gaita”, ou seja, podem vibrar de acordo com a energia sonora. O comprimento dessas fibras aumenta à medida que se afastam da janela oval, porém o diâmetro delas diminui à medida que elas se aproximam do helicotrema, a extremidade da cóclea. Essa engenhosa complexidade permite que as fibras perto da janela oval (que são curtas e mais rígidas) vibrem melhor em frequências mais altas (agudas); por outro lado, as fibras longas e mais flexíveis perto do helicotrema vibram melhor em frequências mais baixas (graves). A essa característica damos o nome de **Princípio do Lugar** (HALL, 2017).

Podemos concluir com isso que a membrana basilar próxima à janela oval possui ressonância em altas frequências, e a membrana basilar mais afastada possui ressonância em frequências mais baixas. Sendo assim, as vibrações no estribo, ao entrarem na cóclea, possuem uma intensidade relativamente baixa, e ao longo de todo o ducto coclear irão fazer vibrar as fibras da membrana basal que apresentam a mesma frequência de ressonância (ou natural) da vibração (som). Nesse momento, a energia da onda sonora se dissipará por completo, e não continuará seu caminho rumo à extremidade da cóclea. Consequentemente, vibrações de alta

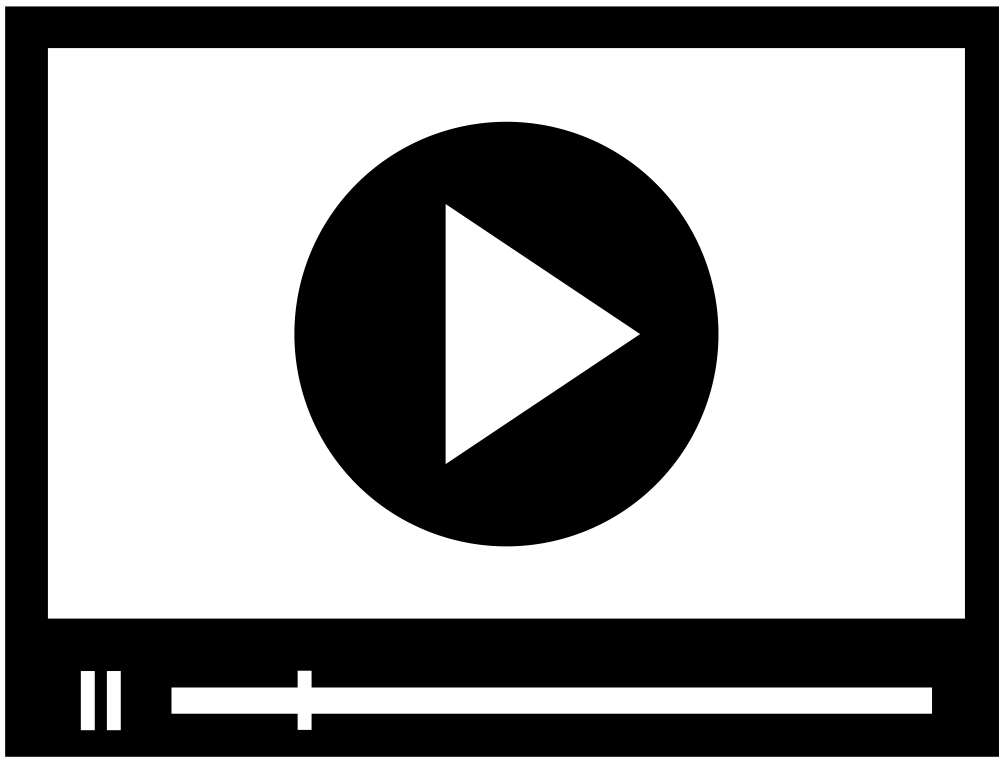
frequência se propagam por curto trajeto ao longo da membrana basilar. Do contrário, vibrações de baixa frequência irão se propagar por uma distância maior.

No órgão de Corti, localizado no modíolo, estão dois tipos de células ou receptores sensoriais: as células ciliadas internas e externas. Essas células fazem sinapse com um conjunto de terminações nervosas, a maioria terminando nas células ciliadas internas. Quando estimuladas, essas células ciliadas enviam axônios para o nervo coclear, e este transmite os sinais nervosos para o sistema nervoso central, mais especificamente, na parte superior do bulbo.



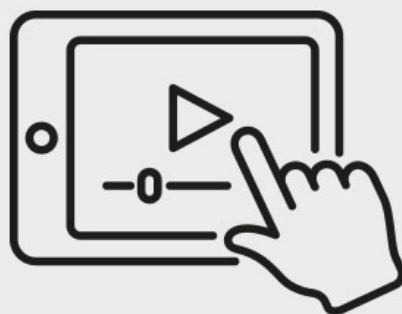
Fonte: Sakurra/Shutterstock.

📷 Secção transversal de um espiral da cóclea.



## TRANSDUÇÃO DO SINAL SONORO EM IMPULSO NERVOSO

Para assistir a um vídeo sobre o assunto, acesse a versão online deste conteúdo.



Considerando um par de cócleas, estima-se que exista, aproximadamente, um total de 30.000 células ciliadas, que realizam a transdução do sinal auditivo. Essas células podem detectar movimentos em dimensões atômicas, interpretando vibrações de dezenas de kilohertz (kHz).

**A intensidade do som é determinada basicamente por três fatores:**

Quanto maior a amplitude de vibração da membrana basilar e das células ciliadas, maior será a intensidade do potencial de ação que levará a informação ao sistema nervoso

central.

Células ciliadas vizinhas àquelas que estão sofrendo ressonância podem também ser estimuladas, o que chamamos de somação espacial.

Vibrações de alta intensidade podem estimular não só as células ciliadas internas, mas também as externas.

**Atenção!** Para visualização completa da tabela utilize a rolagem horizontal

## COMUNICAÇÃO COM O SISTEMA NERVOSO CENTRAL

Na parte superior do bulbo, existem os núcleos cocleares dorsal e ventral. As fibras provenientes do gânglio espiral de Corti fazem sinapse nesse local com outros neurônios, que levam os impulsos para o outro lado do tronco encefálico (em sua maioria), núcleo olivar superior. Daí, algumas vias seguem para o lemnisco lateral na ponte; outras seguem para o colículo inferior do mesencéfalo. Posteriormente, as vias seguem para o núcleo geniculado medial do mesencéfalo e, finalmente, dirigem-se ao córtex auditivo no giro superior do lobo temporal do cérebro.

O córtex auditivo é dividido em primário e secundário (ou de associação auditiva). Este último está envolvido na interpretação do significado dos sons.

Nossas reações ao som, reflexas e aprendidas, requerem integração sensório-motora especializada. Por exemplo, quando ouvimos um pássaro cantar, movimentamos nossa cabeça no sentido da fonte sonora sem percebermos, para melhor captarmos o som.

 **ATENÇÃO**

Além das interconexões para a distribuição da informação auditiva, existe também uma integração dos sinais sensoriais auditivos com as vias motoras no tronco encefálico.

Neurônios reticuloespinhais no lemnisco lateral possuem dendritos que captam a atividade lemniscal e estão envolvidos nas vias reflexas acústicas. As camadas profundas do colículo superior recebem informação auditiva do colículo inferior e das áreas corticais auditivas, além de integrarem informações somestésicas, visual e auditiva, e enviá-las para o tronco encefálico e medula espinhal, através de fibras envolvidas no controle da orientação da cabeça, olhos e corpo em direção a fonte sonora.

## ULTRASSOM

Conforme já vimos, ondas sonoras com frequências acima de 20 kHz são chamadas de ultrassom (ondas ultrassônicas). Após a Segunda Guerra Mundial, o alto desenvolvimento das técnicas de sonar e radar estimulou o uso de sons acústicos no corpo humano.

Os irmãos Dussik (Karl Theodore e Friederich Dussik) foram os primeiros a usar a US para fins diagnósticos, tentando localizar tumores cerebrais por meio de imagens de atenuação por transmissão de US. Seu primeiro artigo foi publicado em 1942, com conclusões adicionais em 1947, após a guerra (MACHADO, 2013).

Os transdutores acústicos são de extrema importância para aplicações ultrassônicas. Eles são amplamente utilizados em equipamentos médicos para gerar e receber ondas acústicas.

### ATENÇÃO

Certos materiais sólidos acumulam cargas elétricas quando submetidos a esforços mecânicos. Esse fenômeno é denominado **piezoelectricidade** (do grego "eletricidade por pressão"), **ou efeito piezoelétrico**, e é a base para a produção de ondas ultrassônicas.

Os irmãos franceses Pierre e Jacques Curie foram os primeiros a demonstrar o efeito piezoelétrico direto (uma carga elétrica resultante de uma força mecânica), em 1880, com cristais, como quartzo e topázio, mas apenas um ano depois eles consideraram o **efeito piezoelétrico inverso** (uma deformação mecânica resultante de um campo elétrico aplicado), previsto por Lippmann, em 1881.

A partir deste momento, o ultrassom tem sido intensamente aplicado nas ciências da saúde, no diagnóstico por imagem (por exemplo, modo A, modo B, Doppler, ultrassom 3D, elastografia etc.) e na terapia. No diagnóstico, um exemplo muito comum é a imagem em modo B: uma série de ecos é recebida por elementos transdutores dentro de uma sonda, esses ecos são colocados um ao lado do outro para formar uma imagem.

As amplitudes do eco são usadas para definir os valores da escala de cinza, por exemplo, branco para amplitude máxima e preto para amplitude zero.



Fonte: GagliardiPhotography/Shutterstock.

📷 Exemplo de imagem ultrassonográfica de feto.





Fonte: Mahony/Shutterstock.

### 📷 Ultrassom terapêutico.

Na Fisioterapia, o chamado ultrassom terapêutico (com a frequência mais comum de 1 Mhz) pode atuar com efeitos térmicos (ou seja, levando a um aumento na temperatura) ou efeitos atérmicos (derivados apenas do estímulo mecânico ao tecido), tendo indicações como cicatrização, anti-inflamatório, regeneração da consolidação óssea.

A tabela abaixo nos mostra valores de velocidade de propagação, impedância acústica e atenuação (pelo coeficiente de atenuação) para alguns tipos de tecidos do nosso corpo (LAUGIER; HAÏAT, 2011):

Tecido	Velocidade de propagação ultrassonora (m/s)	Impedância acústica (kg/s.m)	Coeficiente de atenuação (dB/cm.MHz)
Osso trabecular	1.450 – 1.800	$1,54 \times 10^{-6} - 2,2 \times 10^{-6}$	10 – 40
Osso cortical	3.000 – 4.000	$4 \times 10^{-6} - 8 \times 10^{-6}$	1 – 10



Gordura	1.450	$1,38 \times 10^{-6}$	0,8
Músculo	1.550 – 1.630	$1,65 \times 10^{-6}$ – $1,74 \times 10^{-6}$	0,5 – 1,5
Pele	1.600	$1,7 \times 10^{-6}$	2 – 4

**Atenção!** Para visualização completa da tabela utilize a rolagem horizontal

## VERIFICANDO O APRENDIZADO

**1. QUANDO CONSIDERAMOS OS FENÔMENOS QUE PODEM OCORRER DEVIDO À INTERAÇÃO DO SOM COM A MATÉRIA, OBSERVAMOS A POSSIBILIDADE DE A ENERGIA SONORA SOFRER REFLEXÃO, REFRAÇÃO, DIFRAÇÃO, INTERFERÊNCIA E ABSORÇÃO. NO CASO DA REFLEXÃO, SABE-SE QUE A INTENSIDADE DESSE FENÔMENO DEPENDERÁ DE VÁRIOS FATORES. NESSE CONTEXTO, ASSINALE A ALTERNATIVA CORRETA:**

- A)** A refração da onda sonora em uma interface será maior, quanto maior for a diferença de impedância entre os meios.
- B)** A polarização da onda sonora em uma interface será menor, quanto maior for a diferença de impedância entre os meios.
- C)** A reflexão da onda sonora em uma interface será maior, quanto maior for a diferença de impedância entre os meios.
- D)** A reflexão da onda sonora em uma interface será menor, quanto maior for a diferença de impedância entre os meios.

E) A refração da onda sonora em uma interface será menor, quanto menor for a diferença de impedância entre os meios.

**2. O SISTEMA AUDITIVO É CONSTITUÍDO POR UMA VARIEDADE DE COMPONENTES QUE, JUNTOS, FORMAM UM TRANSDUTOR E AMPLIFICADOR DE ENERGIA SONORA EM POTENCIAIS DE AÇÃO, QUE SERÃO ENVIADOS AO CÉREBRO PARA PROCESSAMENTO. COM RESPEITO AO SENTIDO DA AUDIÇÃO, ANALISE AS AFIRMATIVAS ABAIXO:**

**O TÍMPANO É UMA MEMBRANA QUE VIBRA AO RECEBER ONDAS SONORAS PROVENIENTES DO EXTERIOR DO OUVIDO.**

**O ESTRIBO ESTÁ FIXO AO TÍMPANO PELO SEU CABO, E À BIGORNA PELO LADO OPOSTO.**

**A CÓCLEA É UM SISTEMA DE 3 TUBOS ESPIRALADOS: A RAMPA (OU ESCALA) VESTIBULAR, A RAMPA (OU ESCALA) MÉDIA E A RAMPA (OU ESCALA) TÍMPÂNICA.**

**SENDO ASSIM, ASSINALE A ALTERNATIVA CORRETA:**

- A) As afirmativas I e II estão corretas.
- B) Apenas a afirmativa I está correta.
- C) Apenas a afirmativa II está correta.
- D) As afirmativas I e III estão corretas.
- E) Apenas a afirmativa III está correta.

**1. Quando consideramos os fenômenos que podem ocorrer devido à interação do som com a matéria, observamos a possibilidade de a energia sonora sofrer reflexão, refração, difração, interferência e absorção. No caso da reflexão, sabe-se que a intensidade desse fenômeno dependerá de vários fatores. Nesse contexto, assinale a alternativa correta:**

A alternativa **"C "** está correta.

Quanto maior a diferença de impedância entre dois meios (por exemplo, na interface ar e metal, ou ar e concreto), maior será a reflexão da energia sonora.

**2. O sistema auditivo é constituído por uma variedade de componentes que, juntos, formam um transdutor e amplificador de energia sonora em potenciais de ação, que serão enviados ao cérebro para processamento. Com respeito ao sentido da audição, analise as afirmativas abaixo:**

**O tímpano é uma membrana que vibra ao receber ondas sonoras provenientes do exterior do ouvido.**

**O estribo está fixo ao tímpano pelo seu cabo, e à bigorna pelo lado oposto.**

**A cóclea é um sistema de 3 tubos espiralados: a rampa (ou escala) vestibular, a rampa (ou escala) média e a rampa (ou escala) timpânica.**

**Sendo assim, assinale a alternativa correta:**

A alternativa **"D "** está correta.

O martelo está fixo ao tímpano pelo seu cabo, e à bigorna pelo lado oposto. Por sua vez, a bigorna está articulada com o estribo (base do estribo). Finalmente, a placa do estribo está localizada na abertura (janela) oval do labirinto membranoso da cóclea.

# MÓDULO 3

---

- ⦿ Relacionar os conhecimentos sobre as radiações visíveis com o mecanismo neural da visão

Nossos olhos são transdutores de energia luminosa em impulso nervoso. Toda a luz que incide nesses órgãos deve ser captada e enviada ao sistema nervoso central para posterior processamento. Para entender como se dá esse processo, é preciso compreender antes o que vem a ser o que chamamos de luz.

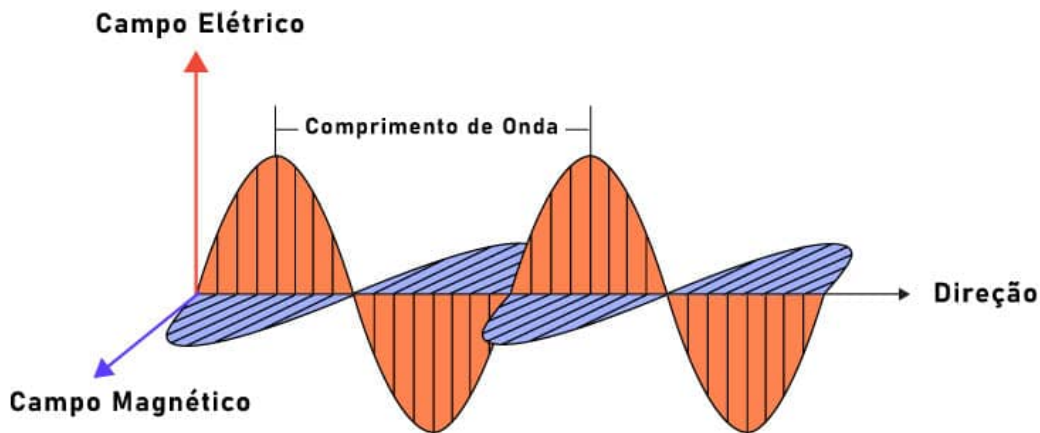
De acordo com Haines (2002), os humanos têm na visão sua principal e mais confiável porta de entrada de estímulos sensoriais. Consequentemente, a ciência hoje sabe mais sobre esse sentido humano do que sobre qualquer outro. O sistema visual é importantíssimo no diagnóstico médico. Cerca de 40% das fibras do cérebro carregam informações relacionadas à função visual. Por conta disso, lesões cerebrais frequentemente podem ser detectadas com disfunções visuais.

## RADIAÇÕES VISÍVEIS

As radiações visíveis nada mais são do que radiações eletromagnéticas (REM), com uma determinada faixa de frequências. As REM são energia se propagando na forma de um campo elétrico (E) e um campo magnético (B) perpendicular com a direção do movimento da carga. Elas são produzidas pela aceleração de cargas elétricas e, uma vez formadas, se irradiam para longe, ou seja, ficam independentes da matéria.

### ATENÇÃO

Todas as REM têm a mesma velocidade de propagação no vácuo de  $v = 3 \times 10^8$  m/s. No entanto, elas diferem entre si pelo comprimento de onda ( $\lambda$ ) e frequência ( $f$ ).

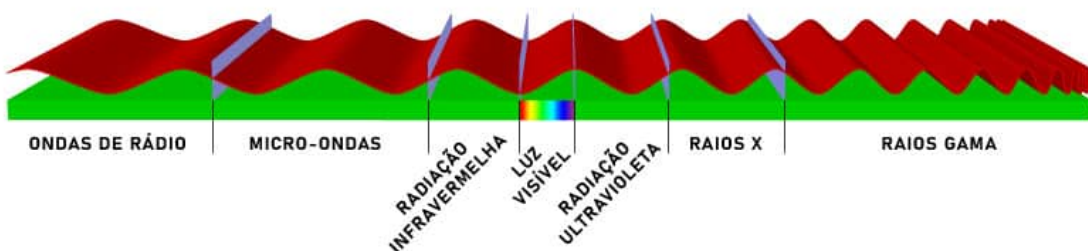


## Onda Eletromagnética

Fonte: Kicky\_princess/Shutterstock.

📷 A onda eletromagnética: campo elétrico e magnético se propagando perpendicularmente.

Os vários tipos de REM são denominados de espectro eletromagnético, de acordo com a  $f$ . Podemos observar na figura que as radiações visíveis possuem uma faixa de frequências muito estreita, se comparadas com as demais formas de ondas. As REM que provocam maiores efeitos na matéria são aquelas com  $\lambda$  mais curtos, logo  $f$  mais altas (por exemplo, os raios-X e gama). A energia se eleva com o aumento da frequência das REM, uma vez que a energia é propagada na forma de unidades discretas chamadas quanta (plural de *quantum*), que não podem ser subdivididas. A energia presente em um *quantum* é chamada de fóton.



Fonte: Milagli/Shutterstock.

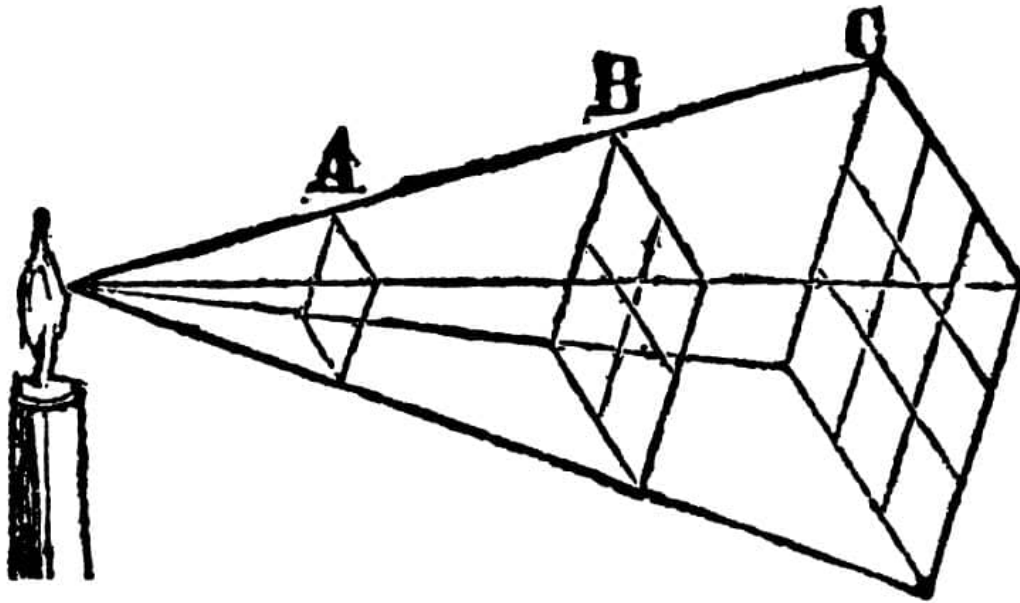
📷 O espectro eletromagnético.

A intensidade das REM, à medida que se propagam, varia de acordo com a Lei do Quadrado Inverso. De acordo com essa lei, a intensidade da onda eletromagnética ( $I$ ) é proporcional ao inverso da distância ( $d$ ) ao quadrado (distância esta em relação à fonte):

$$I \sim \frac{1}{d^2}$$

**Atenção!** Para visualização completa da equação utilize a rolagem horizontal

Note na figura que há uma divergência na intensidade luminosa proveniente da vela. Quanto mais longe, menor a intensidade da onda. A Lei do Quadrado Inverso é especialmente importante na radiologia, pois explica por que devemos nos afastar o máximo possível de uma fonte de radioatividade.

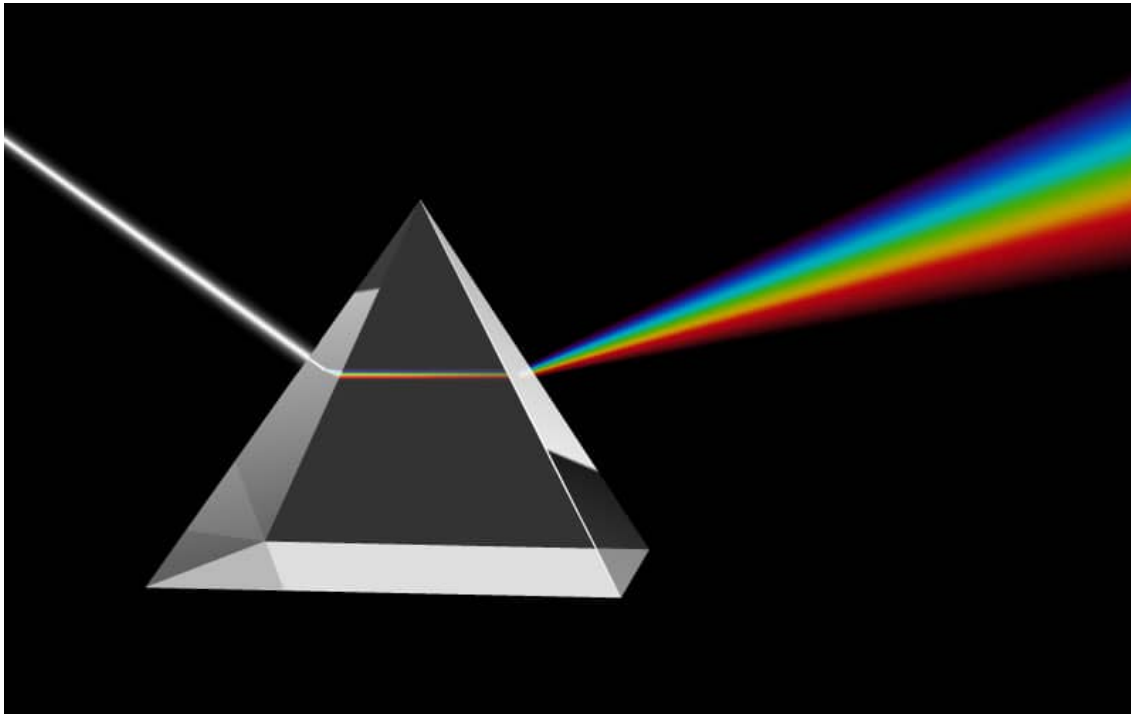


Fonte: Morphart Creation/Shutterstock.

#### 📷 A Lei do Quadrado Inverso.

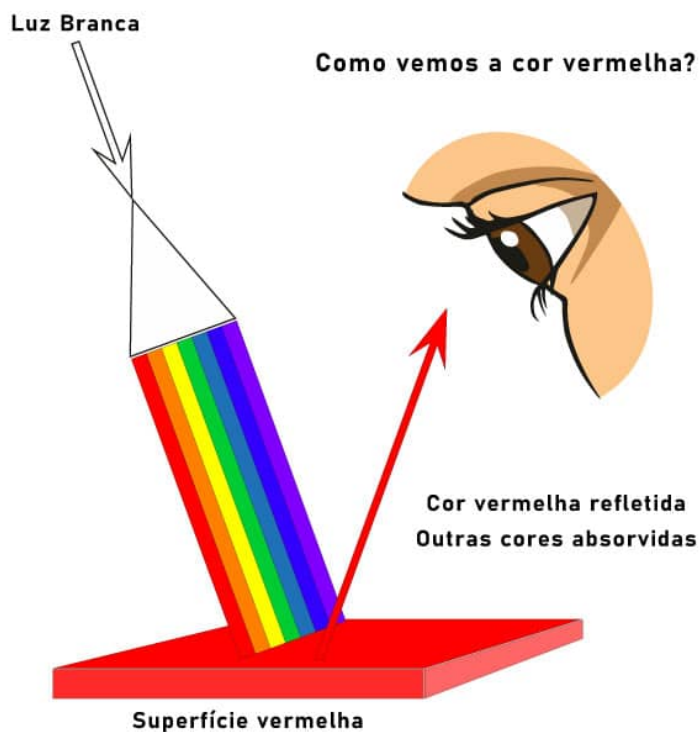
Nossos olhos são capazes de detectar apenas a energia das radiações visíveis. A luz do Sol (ou uma lâmpada incandescente comum) é chamada luz branca, uma vez que, ao incidir sobre um prisma de vidro, a radiação se decompõe em um leque de cores, das quais se destacam sete: vermelha, alaranjada, amarela, verde, azul, anil e violeta (as cores do arco-íris).

O que chamamos de cor, na verdade, é uma onda luminosa (REM) com determinada frequência. O vermelho se desvia menos após a passagem no prisma, enquanto o violeta se desvia mais. Isso ocorre porque a cor vermelha tem maior velocidade do que a violeta, portanto, a primeira sofre menos influência em sua direção de propagação se comparada com a segunda.



Fonte: tuulijumala/Shutterstock.

📷 O prisma e a decomposição da luz branca.



Fonte: udaix/Shutterstock.

📷 Como enxergamos a cor vermelha.

Um objeto é vermelho porque, na verdade, ao receber luz branca, consegue refletir apenas a onda na frequência do vermelho (que é percebida pelos nossos olhos e, consequentemente, interpretada pelo nosso sistema nervoso).

# PRINCÍPIOS FÍSICOS DA ÓPTICA

Óptica é a área da física que estuda a luz. Ela pode ser dividida em óptica física (que estuda a natureza da luz) e a óptica geométrica (que estuda a trajetória da luz). Esta última será o foco de nosso módulo.

A luz pode se propagar em três tipos de meios: o meio transparente, o meio translúcido e o meio opaco.

## MEIO TRANSPARENTE

## MEIO TRANSLÚCIDO

## MEIO OPACO

A luz se propaga de modo regular, ou seja, o observador vê o objeto nitidamente.

A luz se propaga de maneira irregular, ou seja, a imagem percebida pelo observador não possui nitidez.

A luz não consegue se propagar, ou seja, o observador não consegue ver o objeto.

Três princípios regem à óptica geométrica:

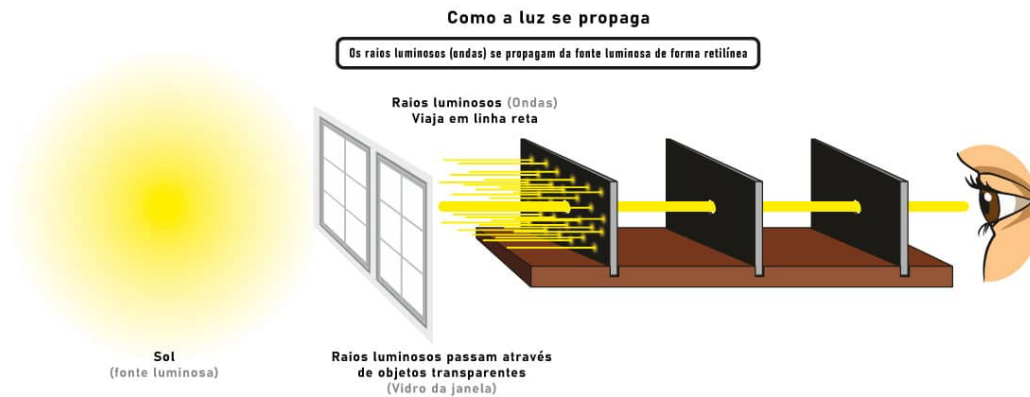
O primeiro deles é o princípio da **independência dos raios luminosos**, segundo o qual, quando dois raios se cruzam em suas trajetórias, um não influencia a propagação do outro.

O outro princípio é o da **reversibilidade dos raios**, que diz que a trajetória de um raio de luz não se altera caso revertamos o sentido do percurso da luz. Por exemplo, o caminho que a luz faz de um ponto A a um ponto B é o mesmo que ela faria do ponto B ao ponto A.

Finalmente, há o **princípio da propagação retilínea**, que diz que os raios de luz se propagam de forma retilínea em meios transparentes (FUKE; SHIGEKIYO; YAMAMOTO, 1999).



**Atenção!** Para visualização completa da tabela utilize a rolagem horizontal



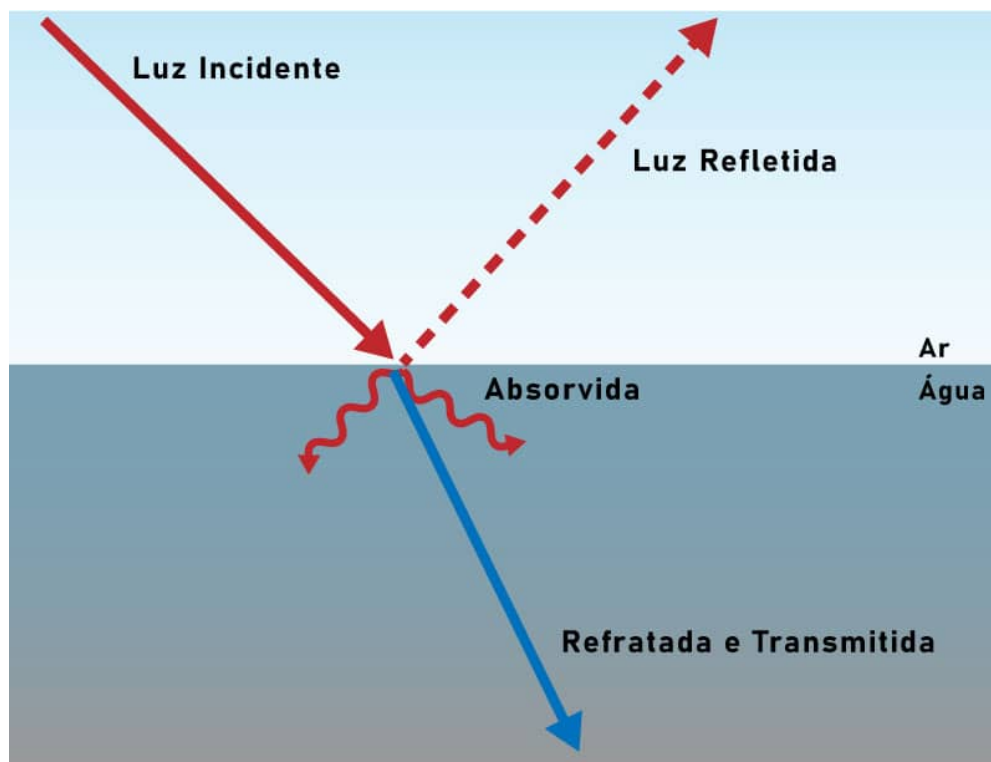
Fonte: udaix/Shutterstock.

📷 Princípio da Propagação Retilínea da Luz.

## 📢 ATENÇÃO

Assim como as ondas sonoras, as ondas luminosas também interagem com a matéria, gerando o que chamamos de fenômenos ópticos: **reflexão (regular e difusa), refração e absorção**.

Na reflexão regular, a luz incidente retorna ao seu meio original após alcançar uma interface entre dois meios, e o ângulo de reflexão é o mesmo do ângulo de incidência (por exemplo, quando a luz incide em um espelho). Já na reflexão difusa, a luz é refletida de modo irregular quando incide em uma superfície não polida (ou rugosa). A refração é a passagem da luz de um meio para outro, ocorrendo uma alteração na direção de propagação do meio. A luz também pode sofrer absorção, que é a perda da energia da onda durante sua propagação na matéria. Essa absorção gera calor.



Fonte: OSweetNature/Shutterstock.

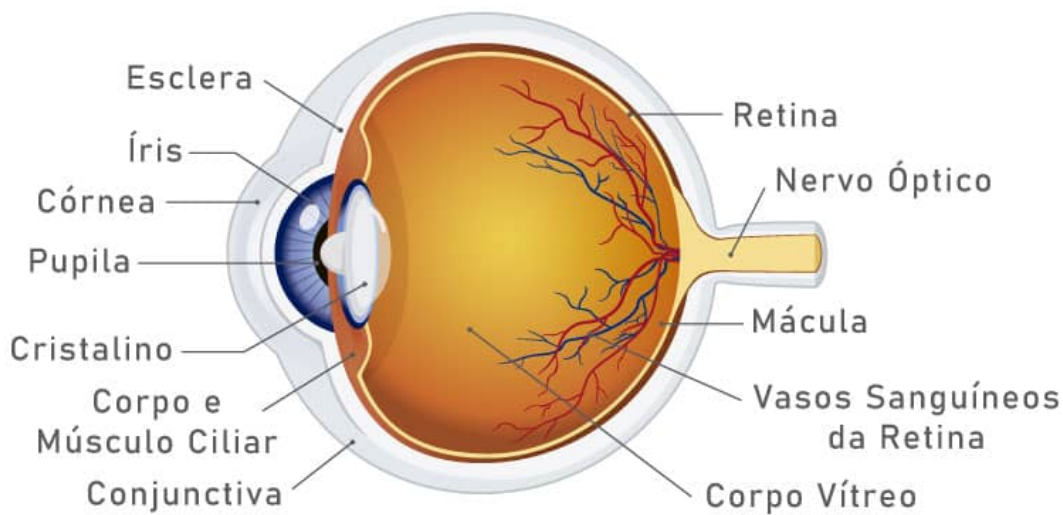
📷 Fenômenos de reflexão, refração e absorção da luz.

## ÓPTICA DA VISÃO

O olho, nosso órgão sensorial da visão, é como se fosse uma câmera fotográfica: um sistema de lentes com uma abertura variável (pupila) e um “filme” para registro das imagens (a retina). A grande função do olho é focar a imagem visual na retina com o mínimo de distorção óptica. O sistema de lentes é composto por quatro interfaces refrativas: (1) interface ar x superfície anterior da córnea; (2) interface superfície posterior da córnea x humor aquoso; (3) interface humor aquoso x superfície anterior do cristalino; (4) interface superfície posterior do cristalino x humor vítreo.

A cada uma dessas interfaces, a luz é refratada. Por essa razão, é importante entendermos um pouco mais sobre a refração da luz.

# Anatomia do Olho Humano



Fonte: solar22/Shutterstock.

📷 Anatomia do olho humano.

Sabemos que a refração provoca uma mudança na direção de propagação da onda luminosa, quando passa de um meio para outro. Isso ocorre por uma mudança na velocidade de propagação da onda naquele meio. Cada meio material possui um índice de refração ( $n$ ), que pode ser calculado com a expressão:

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

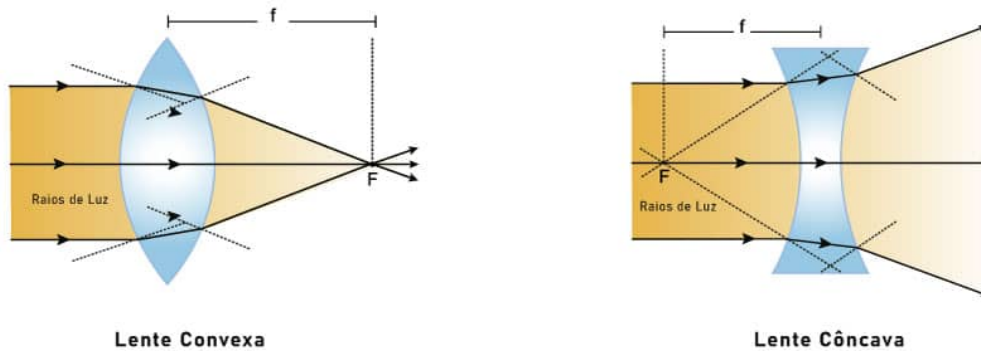
**Atenção!** Para visualização completa da equação utilize a rolagem horizontal

Onde  $c$  é a velocidade da luz no vácuo, e  $v$  é a velocidade da luz no material em questão. O grau de refração da luz pode variar em função de dois fatores: (1) a proporção dos dois índices refrativos dos dois meios; e (2) o grau de angulação que a luz incidente faz com a interface. De acordo com a Lei de Snell, temos uma relação entre os índices refrativos dos dois meios,  $n_1$  e  $n_2$ , e os ângulos de incidência e de refração,  $\theta_i$  e  $\theta_r$ :

$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_r} = \frac{n_2}{n_1}$$

**Atenção!** Para visualização completa da equação utilize a rolagem horizontal

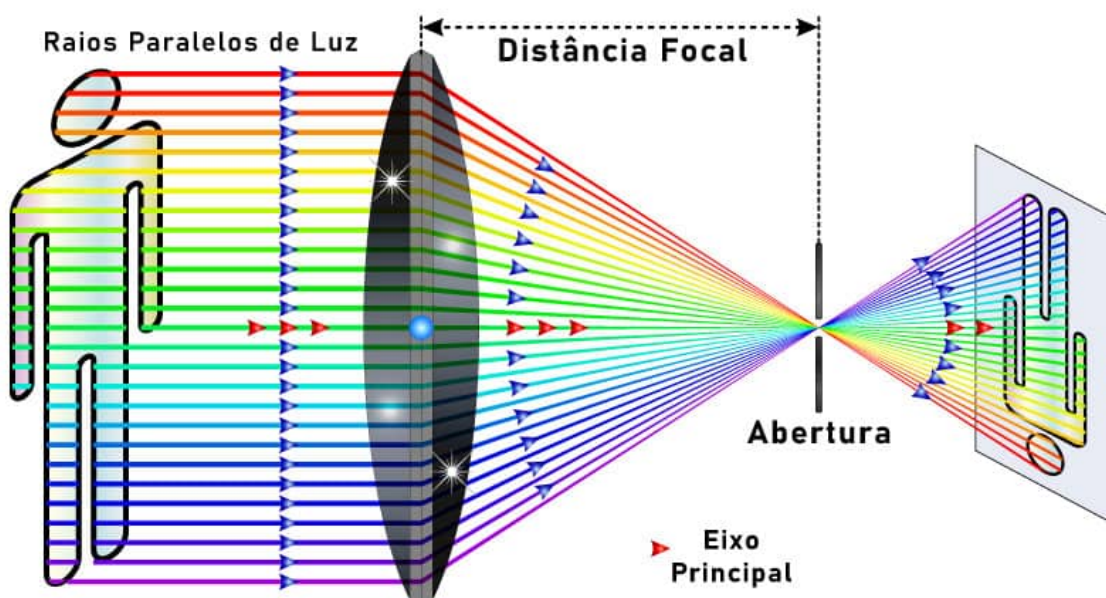
Lentes convexas focalizam os raios luminosos, gerando o que chamamos de convergência dos raios. Já as lentes côncavas divergem os raios luminosos. O cristalino é uma lente convexa, composto por camadas concêntricas fibrosas. Possui 60 a 70% de água, com 6% de gordura. Outro fato interessante é que ele possui mais proteína do que qualquer outro tecido (GONZALEZ; WOODS, 2009).



Fonte: Kicky\_princess/Shutterstock.

📷 Lentes convexas e côncavas ( $f$  = distância focal).

Com uma curvatura apropriada, os raios de luz que incidem na lente podem ser curvados com extrema exatidão para que passem por um ponto focal. Os raios de luz que atravessam a lente convexa chegam ao ponto focal e continuam a se propagar, porém para os lados opostos. Por essa razão, a imagem sempre estará “de cabeça para baixo”, e as laterais da imagem estarão invertidas.



Fonte: Fouad A. Saad/Shutterstock.

📷 Formação da imagem invertida após a passagem da luz na lente convexa.

O poder refrativo do cristalino é relativamente baixo em relação ao poder refrativo total do olho. Porém, ele pode sofrer alteração em sua curvatura para direcionar a refração de maneira mais adequada, mecanismo ao qual chamamos de **acomodação visual**.

Essa acomodação é controlada pelo sistema nervoso parassimpático, ao estimular os músculos ciliares: quando esses músculos se contraem, o cristalino assume uma forma mais esférica, o que aumenta o poder refrativo.



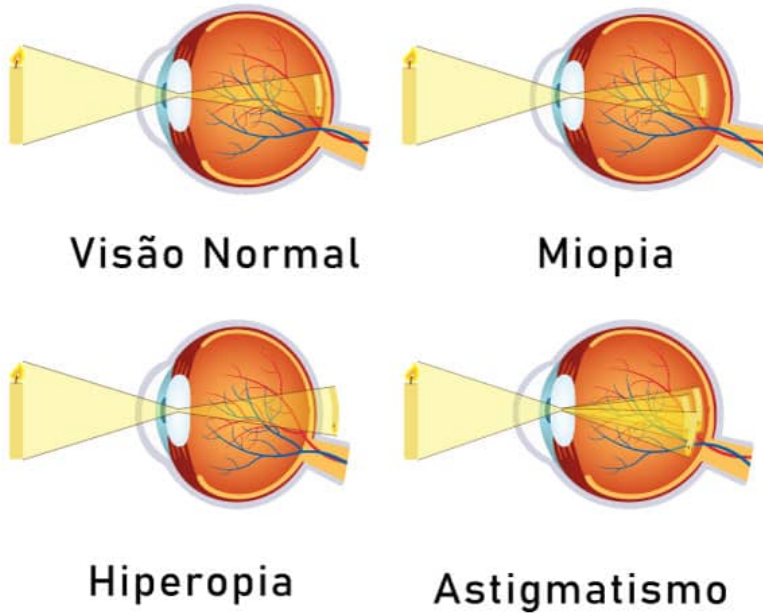
Do contrário, o relaxamento dos músculos ciliares faz com que o cristalino mantenha uma forma mais plana. A presbiopia, que é a redução da acomodação visual, ocorre principalmente em idosos, pela perda da elasticidade do cristalino.

A **íris** é importante no processo de visão, pois aumenta ou reduz a quantidade de luz que entra nos olhos dependendo da iluminação ambiente. Em seu centro, temos a **pupila**, que é uma abertura de diâmetro variável (de 1,5 a 8 mm). A quantidade de luz que entra nos olhos será proporcional à abertura da pupila: quanto maior a abertura pupilar, menor a profundidade de foco. Isso ocorre porque, quanto mais aberta estiver a pupila, mais focará objetos próximos e desfocará o fundo (ou seja, objetos mais distantes).

A visão normal recebe o nome de **emetropia**. Nesse caso, os raios de luz paralelos provenientes de objetos distantes estão em foco com a retina, com o músculo ciliar completamente relaxado. Já na **hiperopia**, os raios paralelos não são curvados o suficiente no cristalino, não alcançando a retina em foco. Isso pode ser causado por um sistema de lentes fraco ou um globo ocular curto. O resultado é a dificuldade para focalizar objetos próximos.

Outro problema de refração é a **miopia**, quando a pessoa possui uma boa visão para objetos próximos. Nesse caso, os objetos distantes são focalizados antes da retina. Causas da miopia podem ser um sistema de lentes com alto poder refrativo, ou com um globo ocular longo.

## Distúrbios da Visão



Fonte: Neokryuger/Shutterstock.

📷 Erros refrativos do olho.

O **astigmatismo**, outro problema ocular, resulta em um problema na córnea (por um formato irregular). Isso provoca erros refrativos, distorcendo a luz e causando múltiplos pontos focais no olho. Dependendo do grau, a pessoa enxerga os objetos embaçados.

## 📢 ATENÇÃO

Lentes diversas podem ser usadas para corrigir tais problemas de refração. Na miopia, utiliza-se uma lente esférica côncava na frente do olho. No caso da hiperopia, uma lente convexa. No astigmatismo, as lentes são definidas por tentativa e erro através de exame oftalmológico. O sistema de lentes do olho focaliza a imagem na retina, que é o órgão sensorial da visão (onde ocorrerá a transdução do sinal luminoso para impulso nervoso).

## RETINA

A retina é o órgão sensorial do olho. Ela possui os fotorreceptores que irão transformar a energia luminosa em impulso nervoso para o cérebro. Os fotorreceptores são dois:

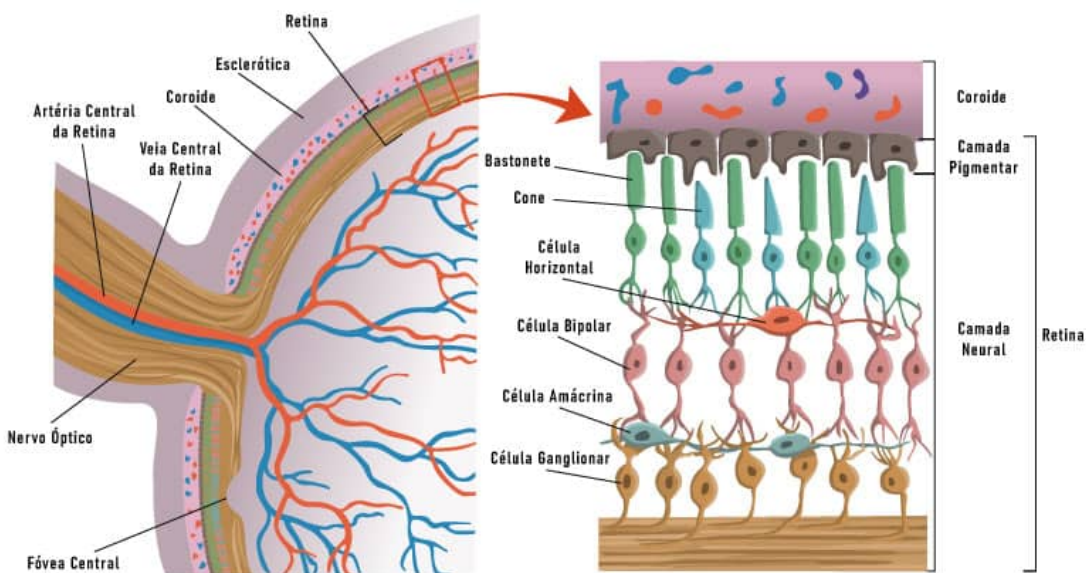
# CONES

Responsáveis pela visão das cores.

# BASTONETES

Responsáveis pela visão preto e branco em baixa luminosidade.

A retina possui diversas camadas de células: a camada pigmentar, mais profunda de todas e composta por melanina; a camada de bastonetes e cones; e as camadas de células horizontais, bipolares, amácrinas e ganglionares. A luz incide primeiramente as células ganglionares, e passa pelas diversas camadas, até alcançar a camada dos cones e bastonetes (a mais externa da retina).



Fonte: Systemoff/Shutterstock.

📷 As camadas da retina.

A fóvea central da retina tem 0,3 mm de diâmetro, possui basicamente cones e detecta detalhes na imagem. A camada pigmentar é importante, pois contém melanina, que tem cor negra e impede a reflexão da luz de volta para o globo ocular.

Nos bastonetes, encontramos a rodopsina como substância fotoquímica. Ela é mais bem absorvida no comprimento de onda de 505 nm (1 nanômetro equivale a  $10^{-9}$  metros). Já nos cones, encontramos três substâncias fotoquímicas, os pigmentos coloridos. São eles os pigmentos sensíveis às cores vermelha, verde e azul (o que chamamos de RGB – *red, green,*

*blue* - respectivamente melhor absorvidos em comprimentos de ondas de 445, 535 e 570 nm).

Um cone só pode ter um dos pigmentos coloridos. Outras diferenças podem ser encontradas na tabela abaixo (KANDEL *et al* ., 2012):

Bastonetes	Cones
Alta sensibilidade à luz, especializados para visão noturna.	Baixa sensibilidade à luz, especializados para visão diurna.
Possui mais substâncias fotoquímicas, portanto capturam mais luz.	Possui menos substâncias fotoquímicas, portanto capturam menos luz.
Maior amplificação da luz.	Menor amplificação da luz.
Resolução temporal baixa, ou seja, tem resposta lenta ao estímulo luminoso.	Resolução temporal alta, ou seja, tem resposta rápida ao estímulo luminoso.
Mais sensível à luz espalhada.	Mais sensível a raios de luz diretos (paralelos).
Acuidade baixa. Não está presente na fóvea central.	Acuidade alta. Estão presentes na fóvea central.
Acromático, ou seja, não detecta cores.	Cromático, ou seja, detecta cores.

**Atenção!** Para visualização completa da tabela utilize a rolagem horizontal



## ❓ VOCÊ SABIA

Quando os bastonetes são excitados, algo curioso ocorre: do contrário de outros receptores sensoriais, há uma hiperpolarização na célula (ou seja, um aumento da eletronegatividade interna). Isso acontece porque a rodopsina, ao ser decomposta, diminui a condutância dos íons  $\text{Na}^+$ .

A maioria das sinapses que ocorrem entre os neurônios da retina é caracterizada como elétrica, ou eletrotônica, ou seja, há o fluxo direto de cargas entre as células. Isso faz com que a magnitude da hiperpolarização dos cones e bastonetes esteja relacionada diretamente à intensidade de iluminação. No caso de uma sinapse química (como a que ocorre com as células ganglionares e o nervo óptico), existe o princípio do “tudo ou nada”, que não permite esse tipo de graduação linear entre estímulo e resposta.

## CÉLULAS HORIZONTAIS

Possuem o papel de aumentar o contraste visual, realizando sinapses inibitórias laterais com bastonetes e cones.

## CÉLULAS AMÁCRINAS

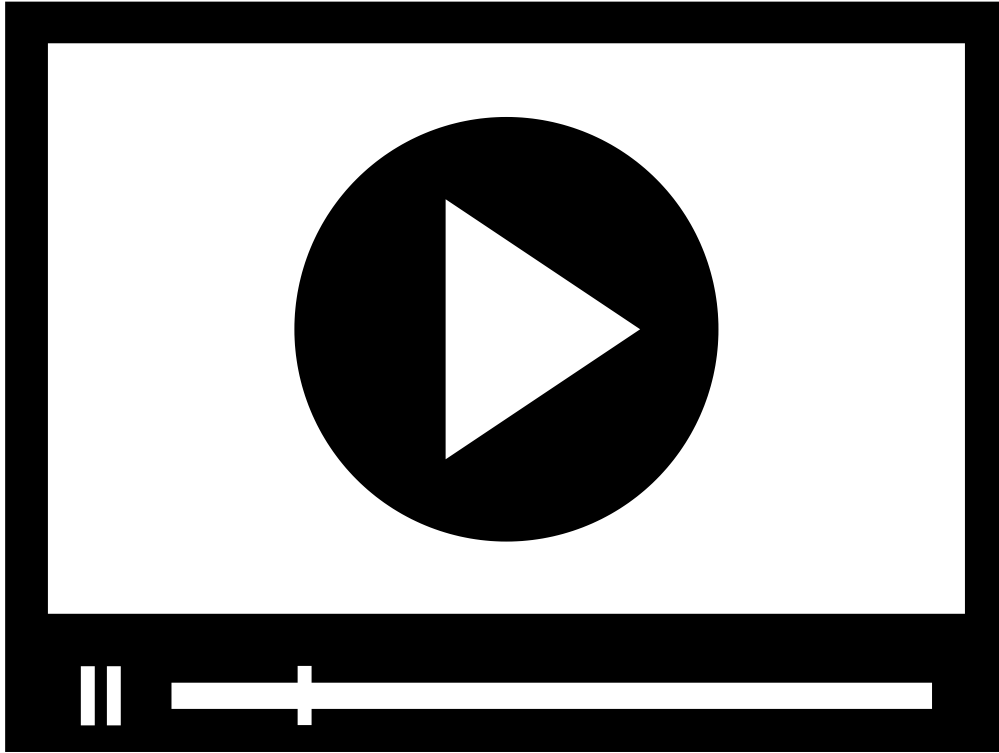
Também inibitórias, participam do aumento do contraste visual, além de ajudarem a analisar os sinais antes que eles saiam da retina.

## CÉLULAS BIPOLARES

Podem ser despolarizantes ou hiperpolarizantes, e possuem a função de controlar os sinais que irão para o cérebro.

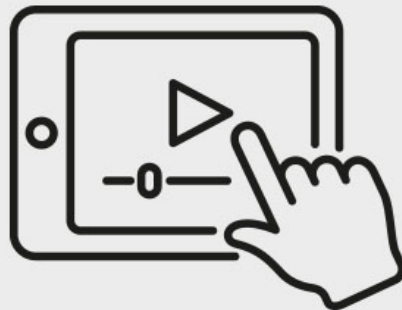
Outro fenômeno interessante é a adaptação a ambientes de baixa e alta luminosidade. Quando uma pessoa se encontra em um ambiente com luz intensa, grande parte das substâncias

fotoquímicas é decomposta, o que faz com que os olhos percam a sensibilidade à luz. Por outro lado, se a pessoa se encontra em um ambiente escuro durante muito tempo, haverá um aumento na concentração dessas substâncias, levando a uma adaptação ao escuro. Essa adaptação à intensidade luminosa externa também pode ocorrer por uma alteração do diâmetro da pupila, ou mesmo por uma adaptação neural.



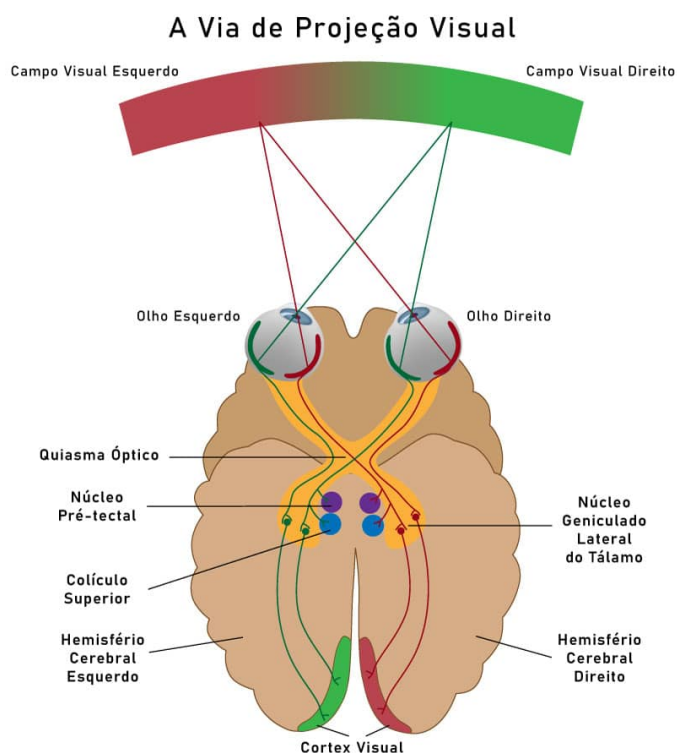
## TRANSDUÇÃO DO SINAL LUMINOSO EM IMPULSO NERVOSO

Para assistir a um vídeo sobre o assunto, acesse a versão online deste conteúdo.



# VIAS NEURAIS DA VISÃO

Após deixarem a retina, os sinais visuais cursam através dos nervos ópticos, se cruzando no quiasma óptico (para o lado oposto) e formando os tratos ópticos. Esses tratos fazem sinapses com o núcleo geniculado lateral do tálamo, e dali cursam para o córtex visual primário, no lobo occipital.



Fonte: Alila Medical Media/Shutterstock.

📷 As vias neurais da visão.

As fibras nervosas também se projetam para outras áreas do cérebro; por exemplo, para os núcleos pré-tectais no mesencéfalo, objetivando desencadear reflexos nos olhos, ou para o colículo superior, controlando os movimentos direcionais rápidos.

O núcleo geniculado lateral, no tálamo, possui duas funções principais. Garantindo sua função de integrador de informações do sistema nervoso central, o tálamo consegue retransmitir informações visuais para o córtex visual com grande fidelidade espacial. Esse núcleo também controla a transmissão dos sinais através de “comportas” (fibras corticofugais e áreas reticulares do mesencéfalo) que inibem os sinais em direção ao córtex visual.

O córtex visual possui duas áreas: o córtex visual primário e o secundário, este último usado para a análise dos significados visuais.

# CONTROLE DOS MOVIMENTOS OCULARES

Pequenos seis músculos controlam o movimento dos olhos. O **músculo reto superior**, **reto medial**, **reto inferior** e **oblíquo inferior** são inervados pelo III par de nervos cranianos (nervo oculomotor). O **músculo oblíquo superior** é inervado pelo IV par, o nervo troclear; o **músculo reto lateral** é inervado pelo VI par, o nervo abducente.

Através dos tratos occipitotectal e occipitocolicular, os sinais eferentes saem do córtex visual em direção às áreas pré-tectal e colículo superior, no tronco cerebral. Dessas áreas, os sinais seguem para o tronco cerebral, para os núcleos dos nervos responsáveis pela motricidade dos olhos. Alguns sinais extras influenciam o controle desses músculos, como os sinais provenientes dos núcleos vestibulares (tronco encefálico) por meio do fascículo longitudinal medial para o controle do equilíbrio.

Os movimentos de fixação dos olhos (por exemplo, para fixarem em um objeto) são controlados por dois mecanismos:

## FIXAÇÃO VOLUNTÁRIA

Na fixação voluntária, sinais eferentes deixam as regiões corticais pré-motoras nos lobos frontais.

## FIXAÇÃO INVOLUNTÁRIA

Na fixação involuntária, áreas visuais secundárias no córtex visual fazem o controle dos movimentos.

**Os olhos também sofrem influência do sistema nervoso autônomo.**

No caso do sistema nervoso simpático, as fibras inervam a íris, levando ao que chamamos de **midríase** (dilatação das pupilas).



O sistema nervoso parassimpático estimula o músculo ciliar (controlando assim o foco do cristalino) e o esfíncter da íris, levando ao que chamamos de **miose** (constrição das pupilas).

A abertura e o fechamento da íris são controlados pelo reflexo fotomotor. Consiste na constrição das pupilas quando a luz incide nos olhos. Quando estamos em um ambiente escuro, não ocorre o reflexo, fazendo com que as pupilas mantenham seus diâmetros normais.

## VERIFICANDO O APRENDIZADO

**1. AS RADIAÇÕES VISÍVEIS NADA MAIS SÃO DO QUE RADIAÇÕES ELETROMAGNÉTICAS (REM), COM UMA DETERMINADA FAIXA DE FREQUÊNCIAS. AS REM SÃO ENERGIA SE PROPAGANDO NA FORMA DE UM CAMPO ELÉTRICO (E) E UM CAMPO MAGNÉTICO (B) PERPENDICULAR COM A DIREÇÃO DO MOVIMENTO DA CARGA. SOBRE AS REM, ASSINALE A ALTERNATIVA INCORRETA:**

- A) Todas as REM têm a mesma velocidade de propagação no vácuo de  $v = 3 \times 10^8$  m/s.
- B) A energia aumenta com o aumento da frequência das REM.
- C) Elas são produzidas pela aceleração de cargas elétricas e, uma vez formadas, ficam dependentes da matéria.
- D) Os vários tipos de REM são denominados de espectro eletromagnético, de acordo com a frequência.
- E) O campo magnético se desloca de acordo com a faixa de frequência.

**2. A RETINA É O ÓRGÃO SENSORIAL DO OLHO. ELA POSSUI OS FOTORRECEPTORES QUE IRÃO TRANSFORMAR A ENERGIA LUMINOSA**

## **EM IMPULSO NERVOSO PARA O CÉREBRO. OS FOTORRECEPTORES E SUAS RESPECTIVAS FUNÇÕES SÃO:**

- A)** Os cones (responsáveis pela visão das cores) e os bastonetes (responsáveis pela visão em preto e branco em baixa luminosidade).
- B)** Os bastonetes (responsáveis pela visão das cores) e os cones (responsáveis pela visão em preto e branco em baixa luminosidade).
- C)** As rodopsinas (responsáveis pela visão das cores) e os bastonetes (responsáveis pela visão em preto e branco em baixa luminosidade).
- D)** Os bastonetes (responsáveis pela visão das cores) e as rodopsinas (responsáveis pela visão em preto e branco em baixa luminosidade).
- E)** Os cones e bastonetes são responsáveis igualmente pela visão de cores e visão em preto e branco.

---

### **GABARITO**

**1. As radiações visíveis nada mais são do que radiações eletromagnéticas (REM), com uma determinada faixa de frequências. As REM são energia se propagando na forma de um campo elétrico (E) e um campo magnético (B) perpendicular com a direção do movimento da carga. Sobre as REM, assinale a alternativa incorreta:**

A alternativa **"C "** está correta.

Elas são produzidas pela aceleração de cargas elétricas e, uma vez formadas, se irradiam para longe, ou seja, ficam independentes da matéria.

**2. A retina é o órgão sensorial do olho. Ela possui os fotorreceptores que irão transformar a energia luminosa em impulso nervoso para o cérebro. Os fotorreceptores e suas respectivas funções são:**

A alternativa **"A "** está correta.

Os fotorreceptores são dois: os cones (responsáveis pela visão das cores) e os bastonetes (responsáveis pela visão em preto e branco em baixa luminosidade).

# CONCLUSÃO

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

No Universo, diversos fenômenos ocorrem de forma periódica. A Ondulatória tenta descrever esses mecanismos para uma melhor compreensão da natureza e dos seres vivos. Vimos que as energias sonora e luminosa ocorrem em forma de ondas, com suas respectivas frequências e comprimentos de onda. Aprendemos também que nosso corpo humano possui todas as ferramentas para captar, discriminar e interpretar esse tipo de energia.

Na audição, verificamos que nosso ouvido é um receptor e transdutor sonoro. Através de um sistema de membrana (tímpano), uma alavanca de três ossos (martelo, bigorna e estribo) e uma rede espiralada de tubos incrustada no osso temporal (a cóclea) conseguem captar as ondas sonoras e transformar essa energia em impulso nervoso, que trafega pelo sistema nervoso central, passando por vários centros subcorticais e corticais.

Na visão, nossos olhos representam um sistema de lentes primoroso, com um fotorreceptor (retina) que capta ondas luminosas na faixa visível (do vermelho ao violeta) e envia os sinais nervosos também para áreas no encéfalo, que farão todo o processamento da informação.

Para ouvir um *podcast* sobre o assunto, acesse a versão online deste conteúdo.



# REFERÊNCIAS

BRASIL. Ministério do Trabalho. **Portaria n. 3.214, de 8 de junho de 1978**. Brasília: Ministério do Trabalho, 1978.

ERROBIDART, H. A.; GOBARA, S. T.; PIUBELLI, S. L.; ERROBIDART, N. C. G. **Ouvido mecânico**: um dispositivo experimental para o estudo da propagação e transmissão de uma onda sonora. *In* : Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 36, n. 1, p. 1507-1 a 1507-6, 2014.

FISH, P. **Physics and Instrumentation of Diagnostic Medical Ultrasound**. West Sussex: John Wiley & Sons, 1990.

FUKE, L. F.; SHIGEKIYO, C. T.; YAMAMOTO, K. **Os Alicerces da Física – Termologia, Óptica, Ondulatória**. São Paulo: Editora Saraiva, 1999.

GARCIA, E. A. C. **Biofísica**. São Paulo: Sarvier, 2002.

GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Processamento Digital de Imagens**. São Paulo: Pearson, 2009.

HAINES, D. E. **Fundamental Neuroscience**. New York: Churchill-Livingstone, 2002.

HALL, J. E. **Guyton e Hall: Tratado de Fisiologia Médica**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017.

KANDEL, E. R.; SCHWARTZ, J. M.; JESSEL, T. M.; SIEGELBAUM, S. A.; HUDSPETH, A. J. **Principles of Neural Science**. New York: McGraw-Hill, 2012.

LAUGIER, P.; HAÏAT, G. **Bone Quantitative Ultrasound**. New York: Springer, 2011.

MACHADO, C. B. **Ultrasound in Bone Fractures: from Assessment to Therapy**. New York: Nova Science Publishers Inc., 2013.

NDT Resource Center. **The Speed of Sound in Other Materials**. In: NDT. Consultado em meio eletrônico em: 13 out. 2020.

RUI, L. R. **A Física na Audição Humana**. Porto Alegre: UFRGS, 2007.

---

## EXPLORE+



Você sabia que a visão desempenha papel importante no controle postural? Leia a revisão “A contribuição visual para o controle postural”, de Antônio Soares, publicada na Revista Neurociências.

---

## CONTEUDISTA

Christiano Bittencourt Machado

 **CURRÍCULO LATTES**