Aula 9

Fenômenos ondulatórios

Física Aplicada à Farmácia

2º semestre 2019

Prof. Henrique A. M. Faria

Introdução

- Uma **onda** consiste numa **perturbação que se propaga** num meio material ou no espaço;
- No meio material a **perturbação** provoca um **deslocamento** temporário de seus constituintes, **átomos e moléculas**;
- **A onda somente transporta energia**.

Introdução

- As **ondas** que se propagam **no espaço** não necessitam de meio material;

  Exemplos:

  - Ondas **eletromagnéticas**
  - Ondas **gravitacionais**;

Introdução

- As **ondas** que se propagam **no espaço** não necessitam de meio material;

  Exemplos:
  - Ondas **eletromagnéticas**
  - Ondas **gravitacionais**;

- Cada **tipo de onda** pode ser caracterizada pela **oscilação** de uma ou mais **variáveis físicas** que se propagam através do meio ou do espaço.

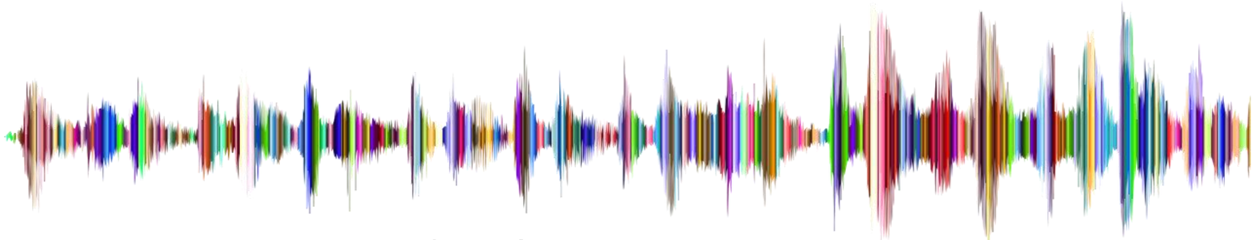
Ondas mecânicas

- As **perturbações se propagam em meios** deformáveis ou elásticos;
- A onda se origina de uma **perturbação em uma região e é transmitida** de um ponto a outro;
- As **partículas do meio vibram** em torno de suas posições de equilíbrio.

Ondas mecânicas - Exemplos

Onda em cordas
de um baixo ou violão.

Onda circular na água.



Ondas sonoras.

Fonte: Pixabay- CCO Creative Commons.

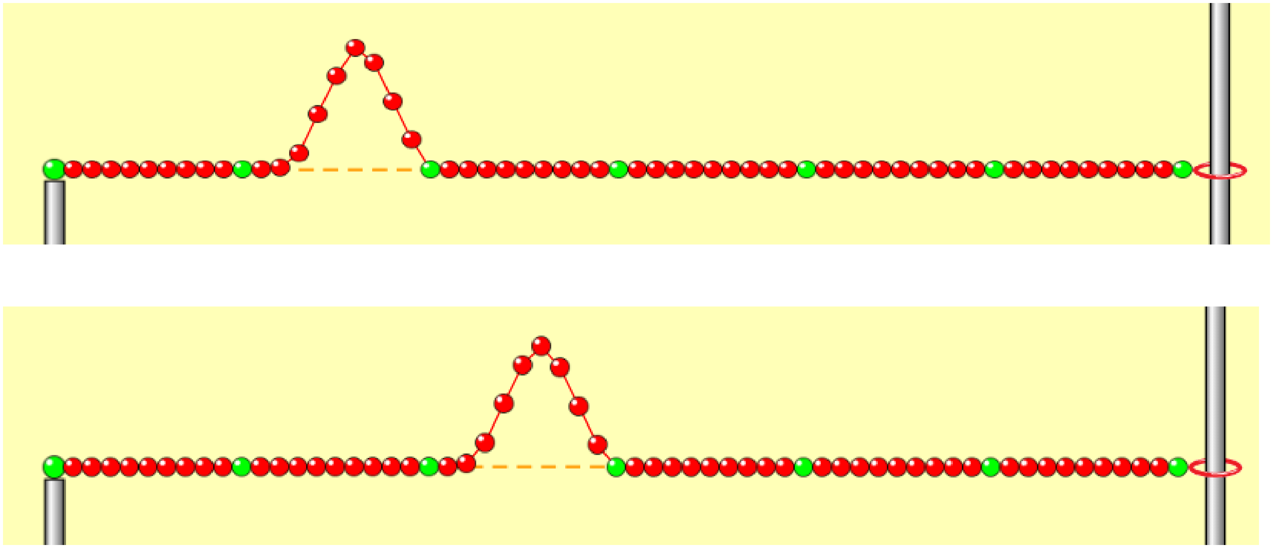
Ondas mecânicas

- Segundo a relação entre a **direção da perturbação** e a **direção da propagação**, as ondas mecânicas podem ser **classificadas** em:

  - **Transversais**;
  - **Longitudinais**;
  - **Compostas**.

Onda mecânica transversal

- Os deslocamentos do meio, ou seja, as **perturbações**, são **perpendiculares à direção de propagação da onda**.



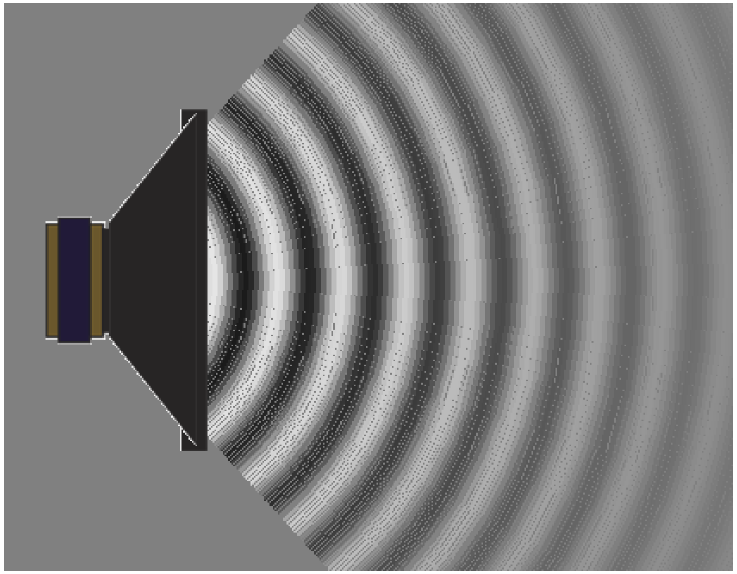
t_1

t_2

Fonte: https://phet.colorado.edu/sims

Onda mecânica longitudinal

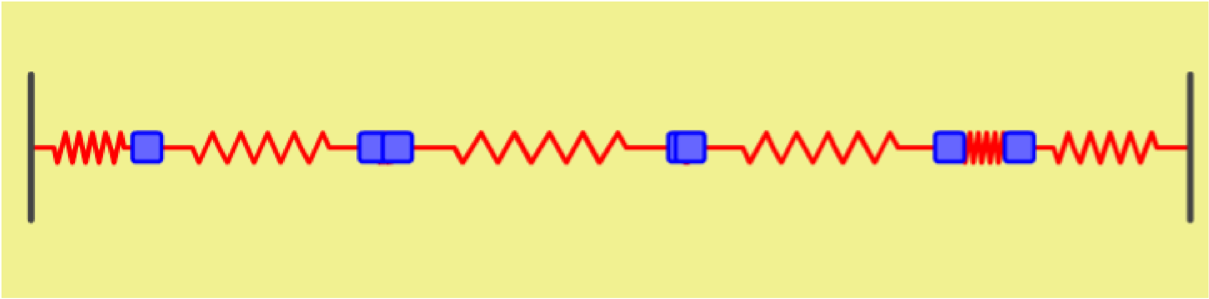
- As **partículas do meio oscilam para frente e para trás** ao longo da mesma direção de propagação.



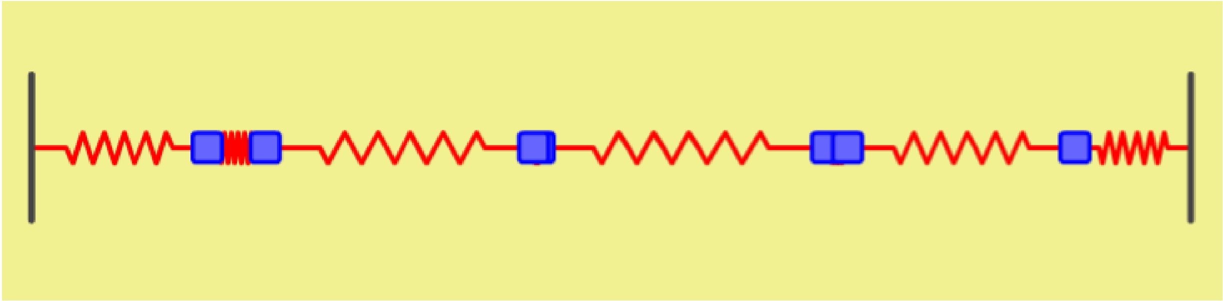
Fonte: https://phet.colorado.edu/sims

Onda mecânica longitudinal

- A onda longitudinal também pode ocorrer em uma mola.



t_1



t_2

Fonte: https://phet.colorado.edu/sims

Onda mecânica composta

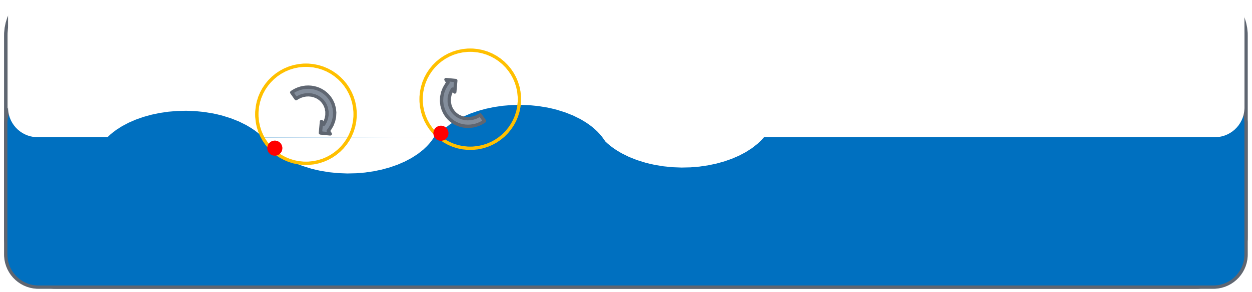
- Variedade de onda constituída pelos **componentes transversal e longitudinal**.

  Exemplo: **ondas em água**.

- Cada partícula da superfície se move em arcos de círculo.

Onda mecânica composta

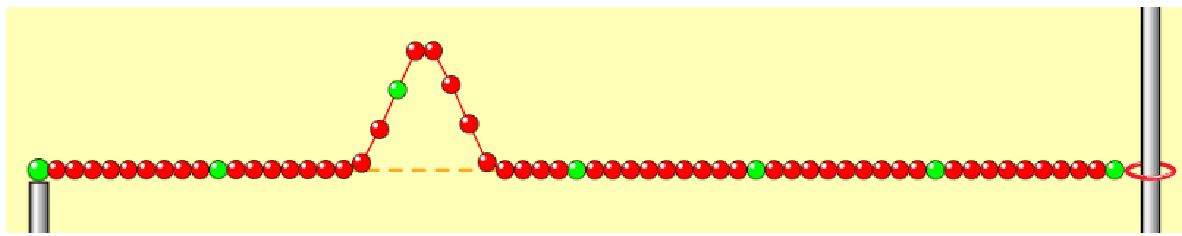
- Variedade de onda constituída pelos componentes transversal e longitudinal.
  Exemplo: ondas em água.
- Cada partícula da superfície se move em arcos de círculo.



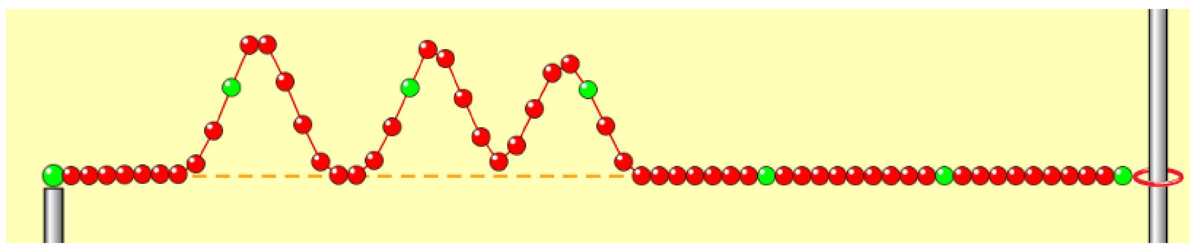
Forma da ondas mecânicas

- Dependendo da duração da perturbação no meio pode-se produzir:

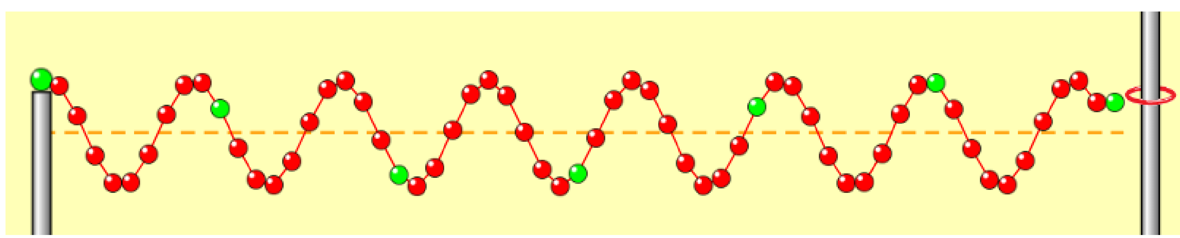
Um pulso



Trem de pulsos



Onda periódica



Fonte: adaptado de: https://phet.colorado.edu/sims

Princípio da superposição

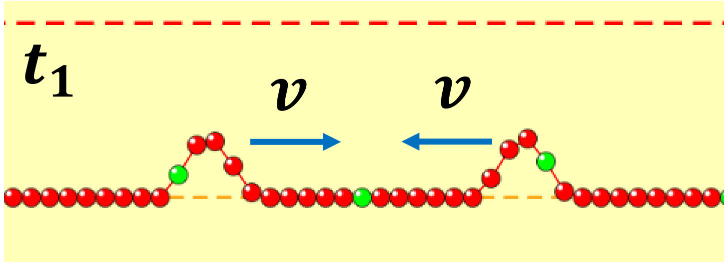
- A perturbação de duas ondas que se encontram em um mesmo ponto em dado instante resultarão em uma **soma algébrica das perturbações**;
- Esse princípio é **aplicável para ondas mecânicas e ondas eletromagnéticas**;
- O **efeito combinado das duas ondas** em um ponto é chamado **interferência**;

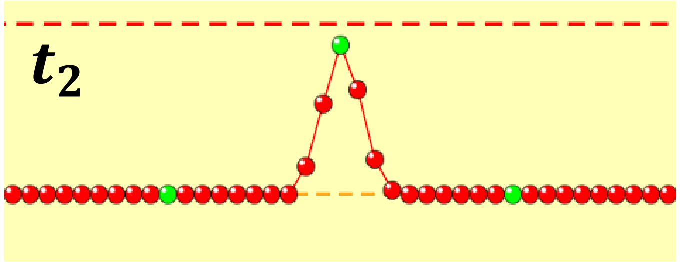
Princípio da superposição

- Quando o **pulso resultante** da superposição **é maior** a **interferência é construtiva**;
- Se os **pulsos** são **invertidos** a resultante da superposição tende a se anular e a **interferência é destrutiva**.

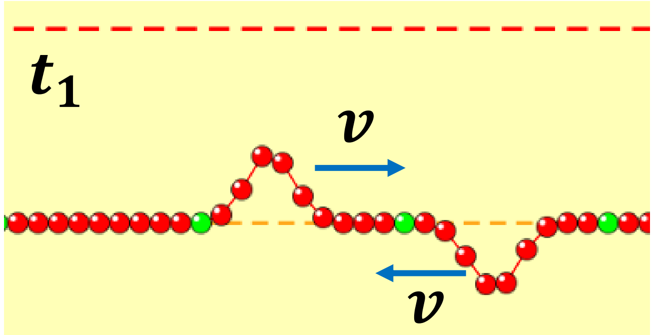
Princípio da superposição

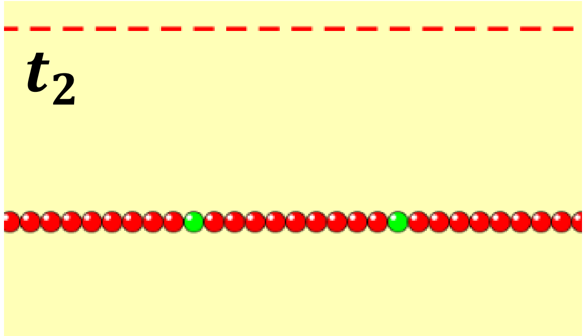
Interferência construtiva





Interferência destrutiva



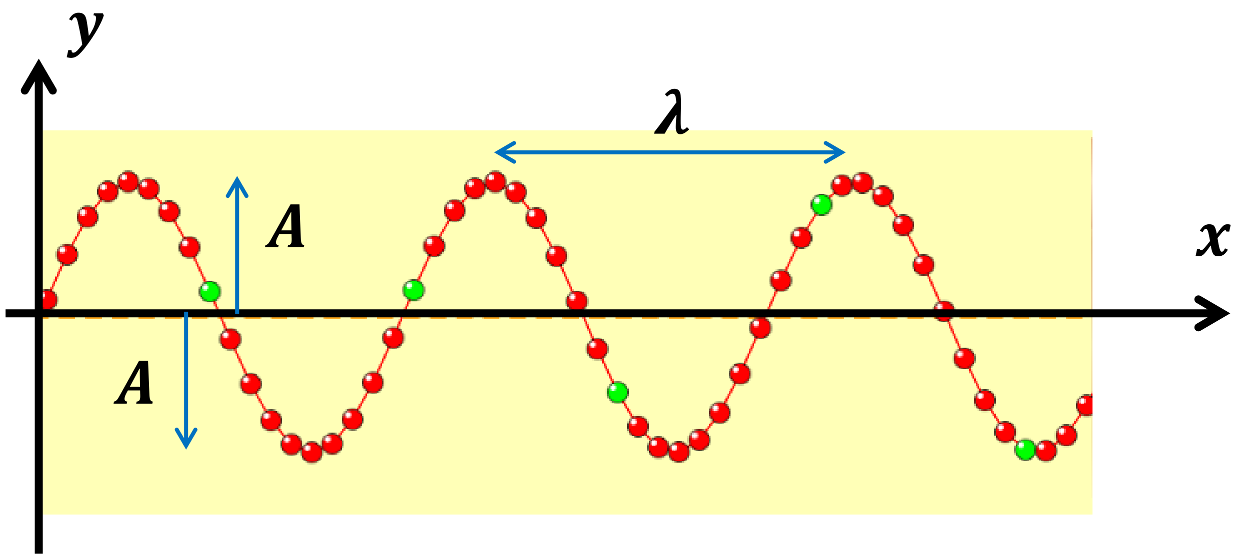


Fonte: adaptado de: https://phet.colorado.edu/sims

Onda harmônica simples

- Pode ser produzida através de **oscilação regular** de uma das extremidades do meio;
- Após algumas oscilações sua **configuração** se torna **periódica**;
- Pode ocorrer nas **ondas mecânicas** (corda e som) e também nas **ondas eletromagnéticas.**

Onda harmônica simples

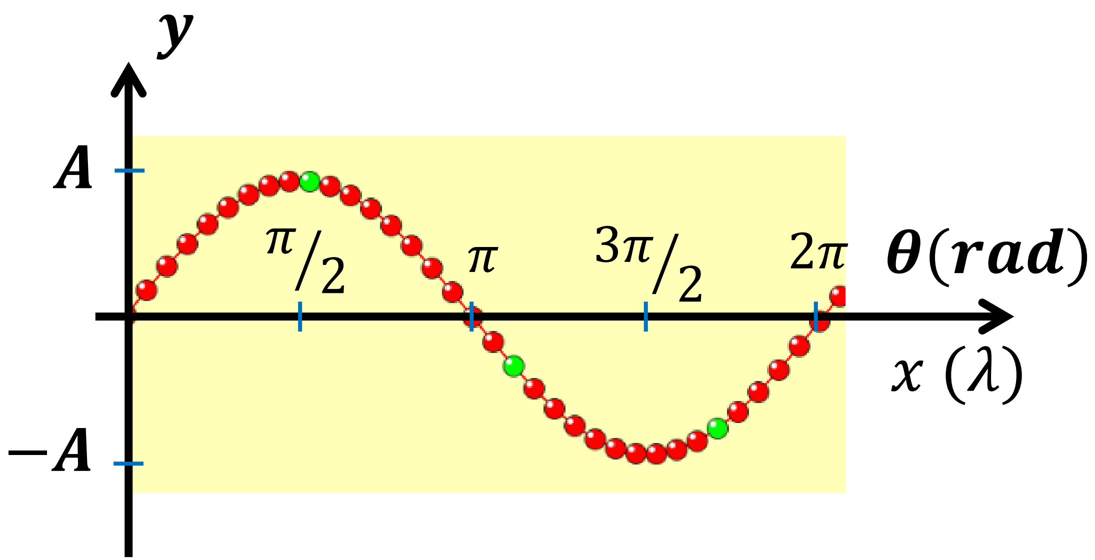


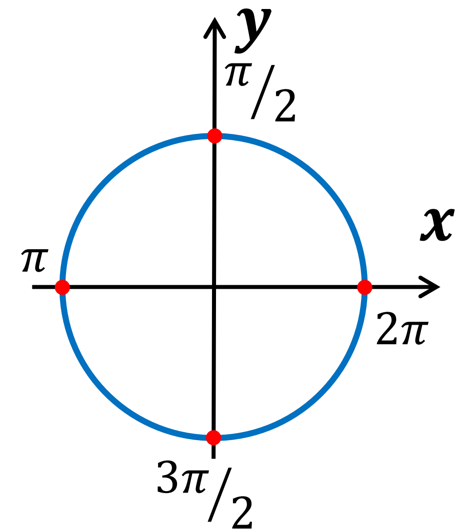
A: amplitude da onda;

λ: comprimento de onda.

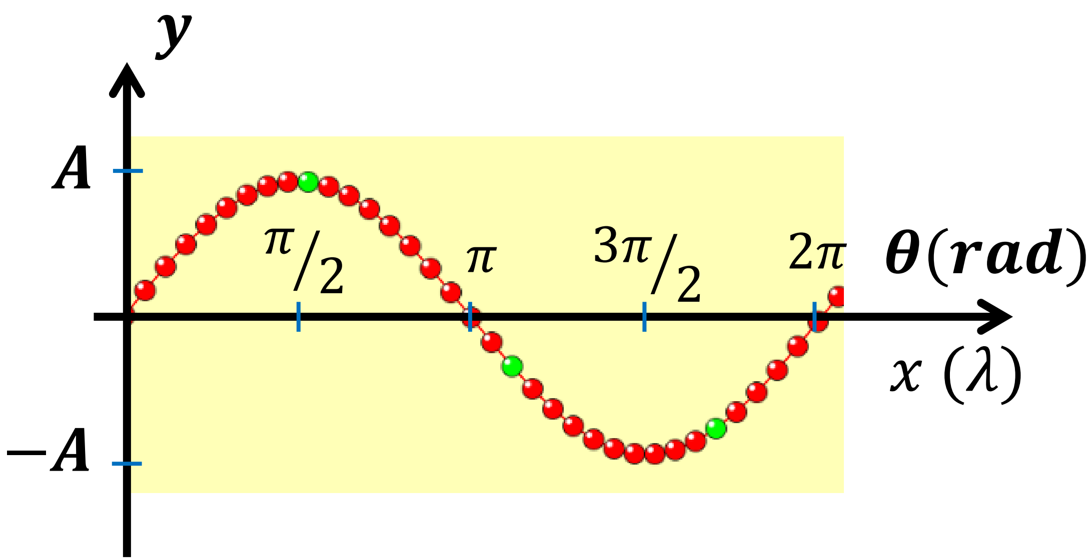
Onda harmônica simples

- A onda harmônica pode ser descrita matematicamente pela função seno.





$\boldsymbol{\theta}$: ângulo do movimento periódico em radianos.

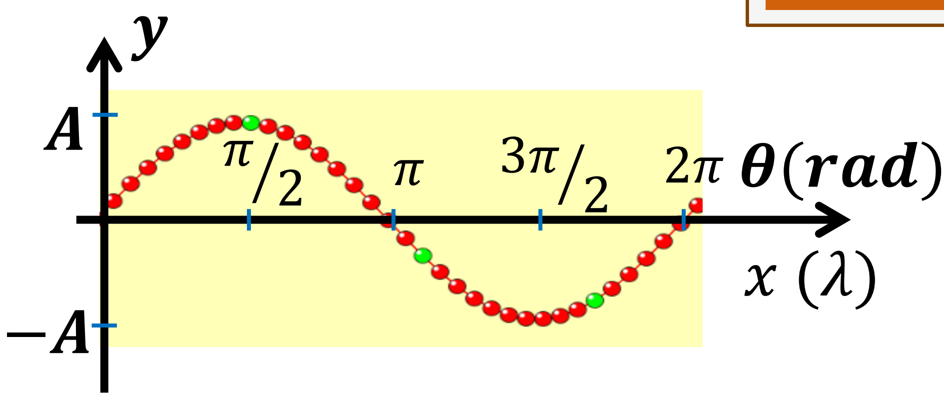


$$y = A\,sen(\theta) \quad (1)$$

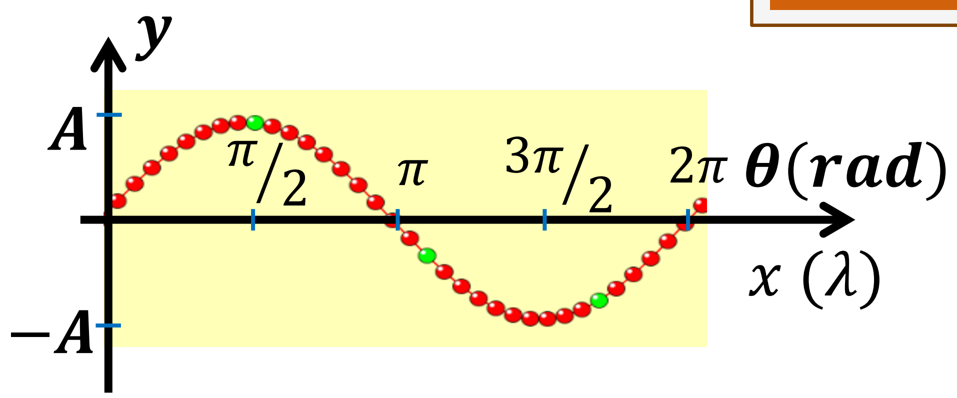
$$mas: \begin{cases} \lambda \rightarrow 2\pi\,rad \\ x \rightarrow \theta \end{cases} \rightarrow \quad \theta = \frac{2\pi}{\lambda}x$$

$$\boxed{y = A\,sen\left(\frac{2\pi}{\lambda}x\right)} \quad (2)$$

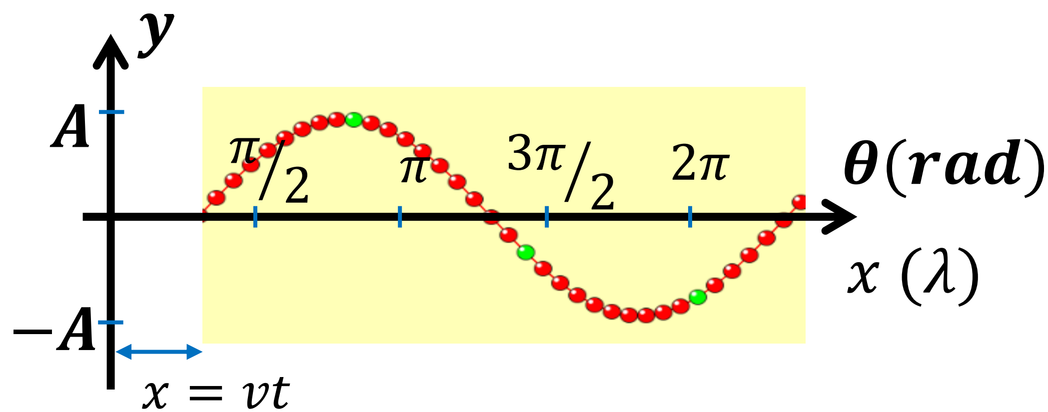
Na equação (2) em $x = 0, \pi\ e\ 2\pi$ a perturbação é nula $(y = 0)$



$\boldsymbol{Instante\ t_1 = 0}$

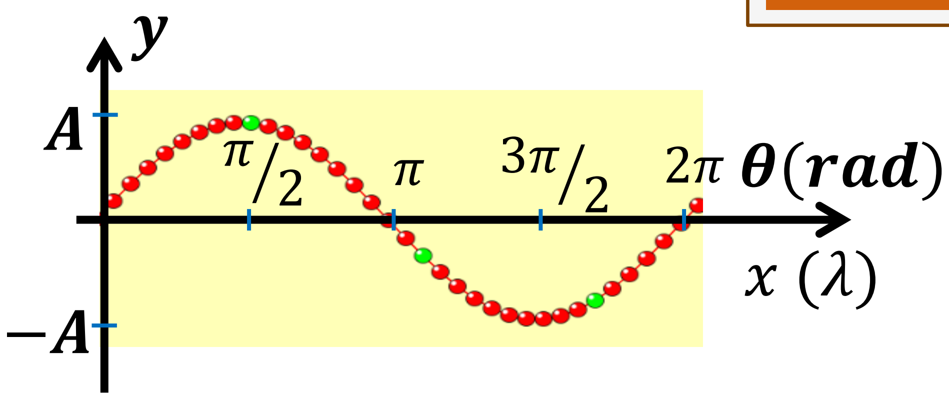


$\boldsymbol{Instante\ t_1 = 0}$

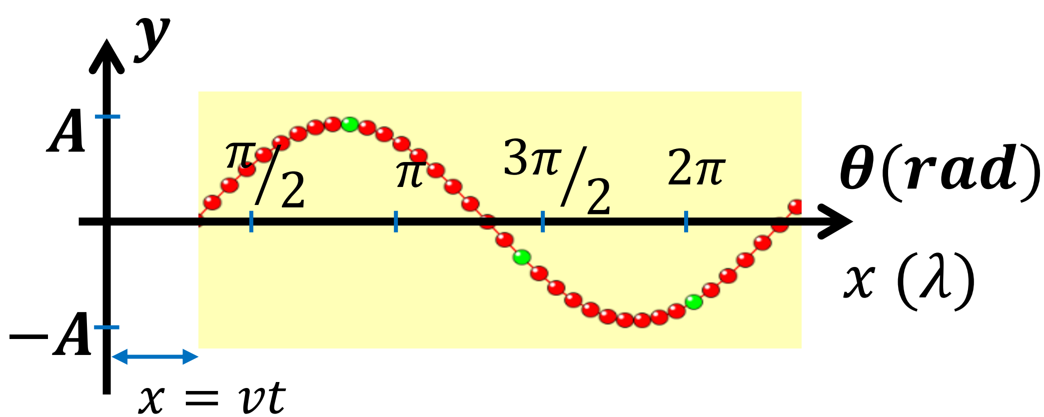


$\boldsymbol{Instante\ t_2}$

No instante $\boldsymbol{t_2}$ a onda caminha o espaço $\boldsymbol{x = vt}$.



$$Instante\ t_1 = 0$$



$$Instante\ t_2$$

$$\boldsymbol{y = A\,sen\left[\frac{2\pi}{\lambda}x - vt\right]} \qquad \textbf{(3)}$$

No instante t_2 a onda caminha o espaço $x = vt$.

Grandezas

Período (T): tempo necessário para um ponto completar um ciclo.

$$T = \frac{\lambda}{v} \qquad (4)$$

$$\boxed{T = \frac{1}{f}} \qquad (5)$$

Substituindo (4) em (5): $\frac{1}{f} = \frac{\lambda}{v} \rightarrow \boxed{v = \lambda f} \quad (6)$

Grandezas

$$T = \frac{\lambda}{v} \qquad (4)$$

Período (T): tempo necessário para um ponto completar um ciclo.

$$\boxed{T = \frac{1}{f}} \qquad (5)$$

Substituindo (4) em (5): $\frac{1}{f} = \frac{\lambda}{v} \rightarrow \boxed{v = \lambda f} \qquad (6)$

Número de onda (k): número de comprimentos de onda na distância 2π.

$$\boxed{k = \frac{2\pi}{\lambda}} \qquad (7)$$

Grandezas

Período (T): tempo necessário para um ponto completar um ciclo.

$$T = \frac{\lambda}{v} \qquad (4)$$

$$\boxed{T = \frac{1}{f}} \qquad (5)$$

Substituindo (4) em (5): $\frac{1}{f} = \frac{\lambda}{v} \rightarrow \boxed{v = \lambda f} \qquad (6)$

Número de onda (k): número de comprimentos de onda na distância 2π.

$$\boxed{k = \frac{2\pi}{\lambda}} \qquad (7)$$

Frenquência angular (ω): Número de períodos contido na distância 2π.

$$\boxed{\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f} \qquad (8)$$

Substituindo as equações $\mathbf{(4)}$, $\mathbf{(7)}$ e $\mathbf{(8)}$ em $\mathbf{(3)}$:

$$y = A\,sen\left[\frac{2\pi}{\lambda}(x - vt)\right] \quad (3)$$

$$T = \frac{\lambda}{v} \quad (4) \qquad k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (7)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (8)$$

$$y = A\,sen\left[2\pi\left(\frac{x}{\lambda} - \frac{v}{\lambda}t\right)\right]$$

Substituindo as equações **(4)**, **(7)** e **(8)** em **(3)**:

$$y = A\,sen\left[\frac{2\pi}{\lambda}(x - vt)\right] \quad (3)$$

$$T = \frac{\lambda}{v} \quad (4) \qquad k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (7)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (8)$$

$$y = A\,sen\left[2\pi\left(\frac{x}{\lambda} - \frac{v}{\lambda}t\right)\right]$$

$$y = A\,sen\left[2\pi\left(\frac{x}{\lambda} - \frac{\lambda}{\lambda T}t\right)\right] \rightarrow y = A\,sen\left[\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \frac{2\pi}{T}t\right)\right]$$

Substituindo as equações (4), (7) e (8) em (3):

$$y = A\,sen\left[\frac{2\pi}{\lambda}(x - vt)\right] \quad (3)$$

$$T = \frac{\lambda}{v} \quad (4) \qquad k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (7)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (8)$$

$$y = A\,sen\left[2\pi\left(\frac{x}{\lambda} - \frac{v}{\lambda}t\right)\right]$$

$$y = A\,sen\left[2\pi\left(\frac{x}{\lambda} - \frac{\lambda}{\lambda T}t\right)\right] \rightarrow y = A\,sen\left[\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \frac{2\pi}{T}t\right)\right]$$

$$\boxed{y = A\,sen[(kx - \omega t)]}$$

Progressão para direita.

$$\boxed{y = A\,sen[(kx + \omega t)]}$$

Progressão para esquerda.

Exemplo 14.2

A equação de uma **onda transversal progressiva numa corda** é expressa por:

$$y = 20\, sen[\pi(0,01x - 2,00t)]$$

Na qual **x** e ***y*** são medidos em **centímetros** e ***t*** em **segundos**. Determine:

a) A amplitude da onda;
b) O comprimento de onda;
c) A velocidade de propagação;
d) A frequência da onda.

Exemplo - solução

Identificamos da equação da onda:

$$y = 20\ sen[\pi(0{,}01x - 2{,}00t)] \qquad y = A\ sen[(kx - \omega t)]$$

a) $\boxed{A = 20\ cm}$ $\quad k = \pi\ 0{,}01 \quad \omega = \pi\ 2{,}00$

b) $k = \frac{2\pi}{\lambda} \rightarrow \lambda = \frac{2\pi}{k}$ $\quad \boxed{\lambda = \frac{2\pi}{\pi\ 0{,}01} = 200\ cm}$

c) $v = \lambda f \rightarrow$ $\boxed{v = 200x1 = 200\ [\frac{cm}{s}]}$

d) $\omega = 2\pi f \rightarrow f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{\pi\ 2{,}00}{2\pi} = 1 \rightarrow$ $\boxed{f = 1{,}00 \left[\frac{rad}{s}\right] = [Hz]}$

Propagação de ondas em meios elásticos

Velocidade de propagação em meios elásticos

- Um **meio elástico tende a conservar sua forma** contra forças externas;
- A **velocidade de propagação da onda** em meios elásticos **depende das características** de elasticidade e da densidade **do meio**.

São válidas as equações:

a) Para ondas transversais em uma corda:

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

$\boldsymbol{F}$: Tensão na corda;

$\boldsymbol{\mu}$: massa por unidade de comprimento.

São válidas as equações:

a) Para ondas transversais em uma corda:

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

$\boldsymbol{F}$: Tensão na corda;

$\boldsymbol{\mu}$: massa por unidade de comprimento.

a) Para ondas longitudinais em um fluido:

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

$$B = \frac{F}{A}\frac{\Delta V}{V}$$

$\boldsymbol{B}$: módulo volumétrico;

$\boldsymbol{\rho}$: densidade do fluido.

São válidas as equações:

a) Para ondas transversais em uma corda:

$$\boxed{v = \sqrt{\frac{F}{\mu}}}$$

$\boldsymbol{F}$: Tensão na corda;

$\boldsymbol{\mu}$: massa por unidade de comprimento.

a) Para ondas longitudinais em um fluido:

$$\boxed{v = \sqrt{\frac{B}{\rho}}} \qquad B = \frac{F}{A}\frac{\Delta V}{V}$$

$\boldsymbol{B}$: módulo volumétrico;

$\boldsymbol{\rho}$: densidade do fluido.

b) Para ondas longitudinais em um sólido:

$$\boxed{v = \sqrt{\frac{Y}{\rho}}} \qquad Y = \frac{F}{A}\frac{\Delta L}{L}$$

$\boldsymbol{Y}$: módulo de Young;

$\boldsymbol{\rho}$: densidade do sólido.

Notas sobre a velocidade de propagação (v)

- A velocidade de propagação ($\boldsymbol{v}$) das ondas num meio **depende da temperatura e da pressão**;
- Nos **meios não dispersivos**, a velocidade de propagação da onda é constante ($\boldsymbol{v} = \boldsymbol{\lambda f} = \boldsymbol{constante}$), isto é, **independe da frequência ($\boldsymbol{f}$)** e do **comprimento de onda (λ).**
- Quando uma **onda passa de um meio para outro a frequência permanece constante**, mas a velocidade e o comprimento de onda mudam;

Exemplo 14.3

Qual é a velocidade da onda numa corda de violão, cuja massa por unidade de comprimento é 0,015 Kg/m, na qual é aplicada uma tensão de 30 N?

Resposta: $v = 44{,}7\ m/s$

Ondas estacionárias

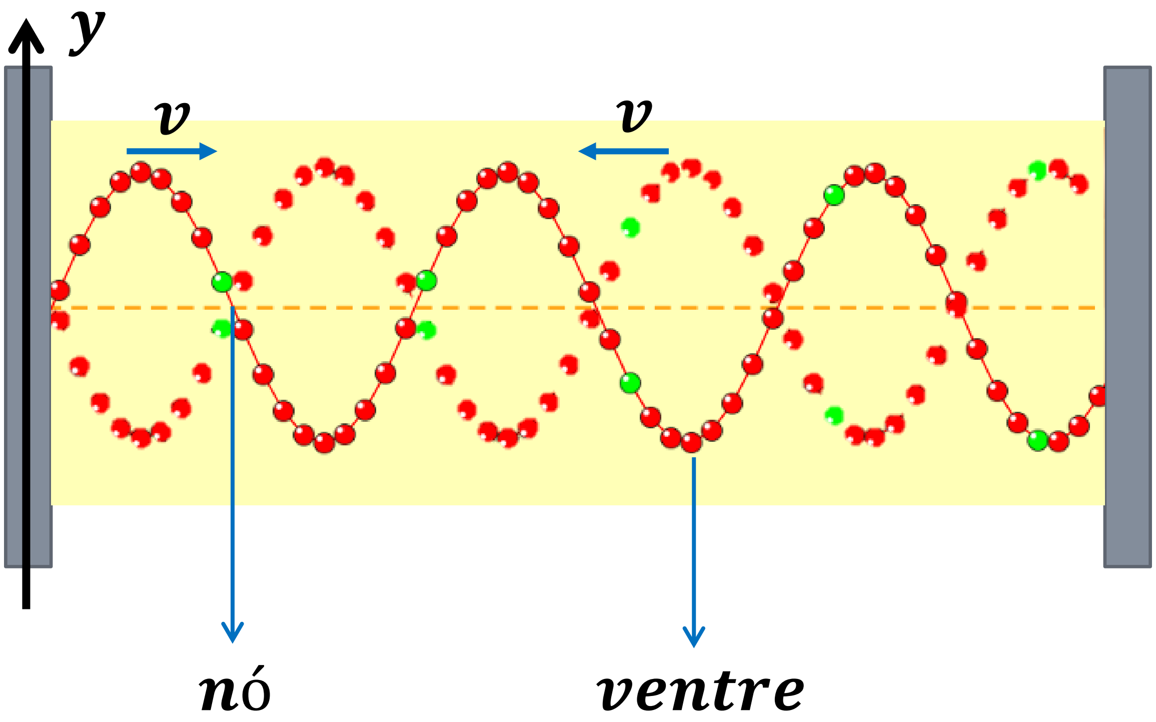
Ondas estacionárias

- **Onda confinada em um espaço**, como uma corda presa em duas extremidades;
- As ondas em espaços confinados sofrem **reflexões em ambas as extremidades**;

Ondas estacionárias

- **Onda confinada em um espaço**, como uma corda presa em duas extremidades;
- As ondas em espaços confinados sofrem **reflexões em ambas as extremidades**;
- As **ondas refletidas se somam pelo princípio da superposição**;
- A **onda estacionária não se propaga** pela corda, ou pelo meio.

Ondas estacionárias



$nó$: Deslocamento vertical (y) nulo;

$ventre$: Deslocamento vertical máximo.

Transporte de energia por ondas

- Em uma onda progressiva a **energia é transmitida no sentido da propagação**;
- Uma corda colocada no ar ou em um líquido irá dissipar energia até parar, se não houver nova perturbação;

Transporte de energia por ondas

- Em uma onda progressiva a **energia é transmitida no sentido da propagação**;
- Uma corda colocada no ar ou em um líquido irá dissipar energia até parar, se não houver nova perturbação;
- Nas **ondas estacionárias não há transmissão de energia**. Porém, **a energia** permanece estacionária **alternando-se entre cinética e potencial elástica**;

Transporte de energia por ondas

Quando não há dissipação de energia a intensidade (I) da onda é expressa por:

$$\boxed{I = \frac{E}{S\Delta t}} \quad [w/m^2]$$

$\boldsymbol{I}$: Intensidade da onda; $\boldsymbol{E}$: energia;

$\boldsymbol{S}$: área perpendicular à direção de propagação; $\Delta\boldsymbol{t}$: intervalo de tempo.

Transporte de energia por ondas

Quando não há dissipação de energia a intensidade (I) da onda é expressa por:

$$\boxed{I = \frac{E}{S\Delta t}} \; [w/m^2]$$

$\boldsymbol{I}$: Intensidade da onda; $\boldsymbol{E}$: energia;
$\boldsymbol{S}$: área perpendicular à direção de propagação; $\Delta\boldsymbol{t}$: intervalo de tempo.

No caso particular de uma onda transversal ou longitudinal harmônica senoidal temos:

$$\boxed{I = 2\pi^2 \rho v f^2 A^2} \, [w/m^2]$$

$\boldsymbol{I}$: Intensidade da onda;
$\boldsymbol{v}$: velocidade de propagação;
$\boldsymbol{\rho}$: densidade do meio;
$\boldsymbol{f}$: frequência;
$\boldsymbol{A}$: amplitude da onda.

Ondas sonoras

Ondas sonoras

- Produzida por um **elemento vibrador** que **causa variações na densidade ou pressão do meio em seu entorno**;
- Caso o meio seja o **ar ocorre a compressão e rarefação** que se propagam como **ondas progressivas**;

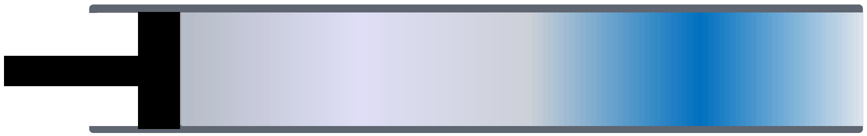
Ondas sonoras

- Produzida por um **elemento vibrador** que **causa variações na densidade ou pressão do meio em seu entorno**;
- Caso o meio seja o **ar ocorre a compressão e rarefação** que se propagam como **ondas progressivas**;
- **A ondas sonoras são ondas mecânicas longitudinais**;
- Podem se propagar em meios sólidos, líquidos e gasosos.

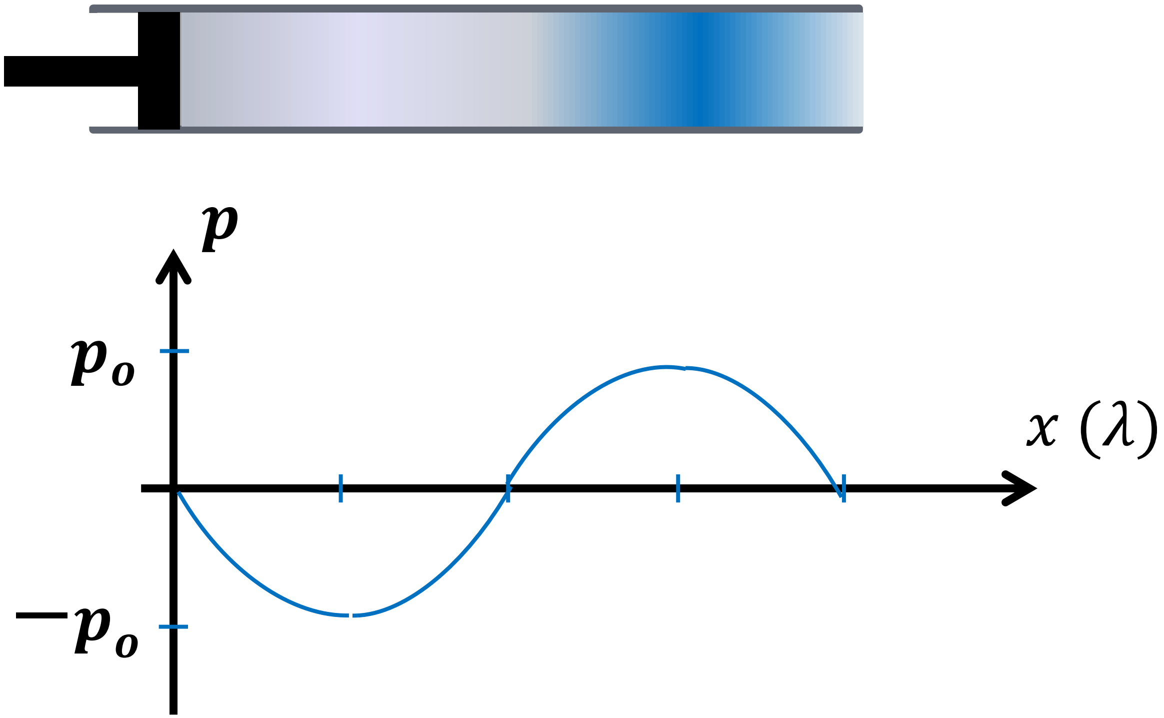
Ondas sonoras

- Os animais superiores interagem com o ambiente ao seu redor através das ondas sonoras;
- O **ouvido humano** percebe sons com **frequências entre 20 e 20.000 Hz**.
- As ondas sonoras **abaixo de 20 Hz** são chamadas **infrassom** e **acima de 20.000 Hz** **ultrassom**.

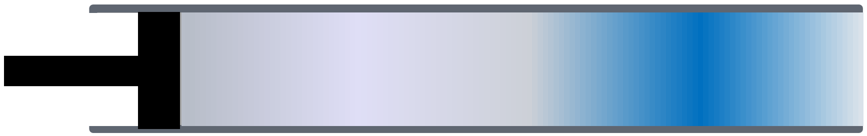
Ondas harmônica sonora

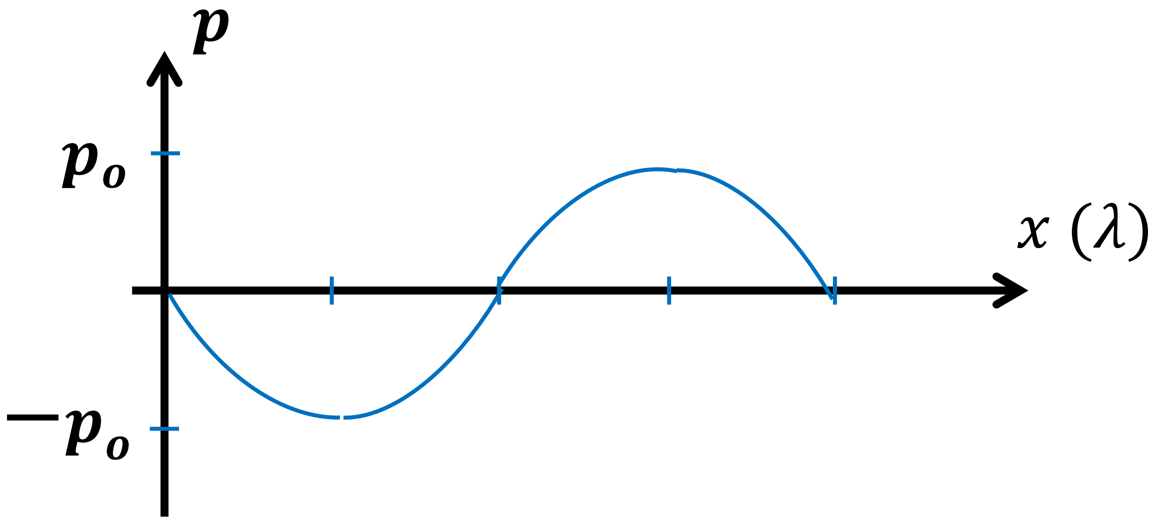


Ondas harmônica sonora



Ondas harmônica sonora





$$p = p_o\, sen\,(kx - \omega t) \quad (1)$$

Ondas harmônica sonora

$$\boldsymbol{p = p_o\, sen\,(kx\ - \omega t)} \qquad \mathbf{(1)}$$

$\boldsymbol{p}$: variação da pressão em relação à pressão de equilíbrio;
$\boldsymbol{p_o}$: valor máximo da variação da pressão.

Ondas harmônica sonora

$$p = p_o \, sen\,(kx - \omega t) \quad (1)$$

p: variação da pressão em relação à pressão de equilíbrio;
p_o: valor máximo da variação da pressão.

Quando a **onda sonora passa de um meio para outro**, a **frequência (f) permanece constante** e a expressão para velocidade (v) continua válida:

$$v = \lambda f \quad (2)$$

Onda harmônica sonora

Também são válidas as expressões para os meios elásticos:

$$\boldsymbol{v = \sqrt{\frac{B}{\rho}}} \qquad \boldsymbol{B = \frac{F}{A}\frac{\Delta V}{V}} \qquad (fluidos)$$

$$\boldsymbol{v = \sqrt{\frac{Y}{\rho}}} \qquad \boldsymbol{Y = \frac{F}{A}\frac{\Delta L}{L}} \qquad (sólido)$$

$\boldsymbol{B}$: módulo volumétrico; $\boldsymbol{Y}$: módulo de Young.

Intensidade do som

A expressão da intensidade pode ser expressa em função da amplitude (A) do deslocamento horizontal dos elementos de volume:

$$I = \rho \frac{v}{2} (A\omega)^2 \quad (3)$$

Outra expressão para intensidade é:

$$I = \frac{(p_0)^2}{2\rho v} \quad (4)$$

Intensidade do som

Substituindo (4) em (3) temos:

$$\frac{(p_0)^2}{2\rho v} = \rho \frac{v}{2} (A\omega)^2 \rightarrow \boxed{p_0 = (\rho v)\omega A} \quad (5)$$

Intensidade do som

Substituindo (4) em (3) temos:

$$\frac{(p_0)^2}{2\rho v} = \rho \frac{v}{2} (A\omega)^2 \rightarrow \boxed{p_0 = (\rho v)\omega A} \quad (5)$$

O produto (ρv) é chamado de **impedância acústica do meio (Z)**:

$$\boxed{Z = \rho v} \quad (6)$$

Intensidade do som em decibel

- O **ouvido humano** pode detectar intensidades sonoras que vão de $\mathbf{10^{-12}\ w/m^2}$ **até** $\mathbf{1\ w/m^2}$;
- Devido a esse **grande intervalo**, é utilizada uma **escala logarítmica de base dez** para definir o **nível de intensidade sonora** $\boldsymbol{\beta}$ $(Decibel - dB)$:

Intensidade do som em decibel

- O **ouvido humano** pode detectar intensidades sonoras que vão de $\mathbf{10^{-12}\ w/m^2}$ **até** $\mathbf{1\ w/m^2}$;
- Devido a esse **grande intervalo**, é utilizada uma **escala logarítmica de base dez** para definir o **nível de intensidade sonora** $\boldsymbol{\beta}$ $(Decibel - dB)$:

$$\boxed{\boldsymbol{\beta(dB) = 10\ log\left(\frac{I}{I_0}\right)}} \qquad (7)$$

$\boldsymbol{I}$: Intensidade sonora;

$\boldsymbol{I_o}$: Intensidade sonora de referência $10^{-12}\ w/m^2$.

Intensidade do som em decibel

- Portanto os limites de **intensidade sonora audível** vão de $0\ e\ 120\ dB$, pois:

$$\beta(dB) = 10\ log\left(\frac{10^{-12}}{10^{-12}}\right) = 0\ dB$$

$$\beta(dB) = 10\ log\left(\frac{1}{10^{-12}}\right) = 120\ dB$$

Na tabela estão relacionados alguns valores para a intensidade e nível de intensidade do som em algumas situações.

som	**Intensidade (w/m^2)**	**Nível de intensidade (dB)**
Limiar da audição	10^{-12}	0
Murmúrio (a 5m)	10^{-9}	30
Conversação (a 1m)	10^{-6}	60
Tráfego pesado	10^{-5}	70
Metrô	10^{-3}	90
Decolagem de jato	10^{3}	120

Fonte: Adaptado de Okuno, 1982, p. 225.

Sensibilidade do ouvido humano

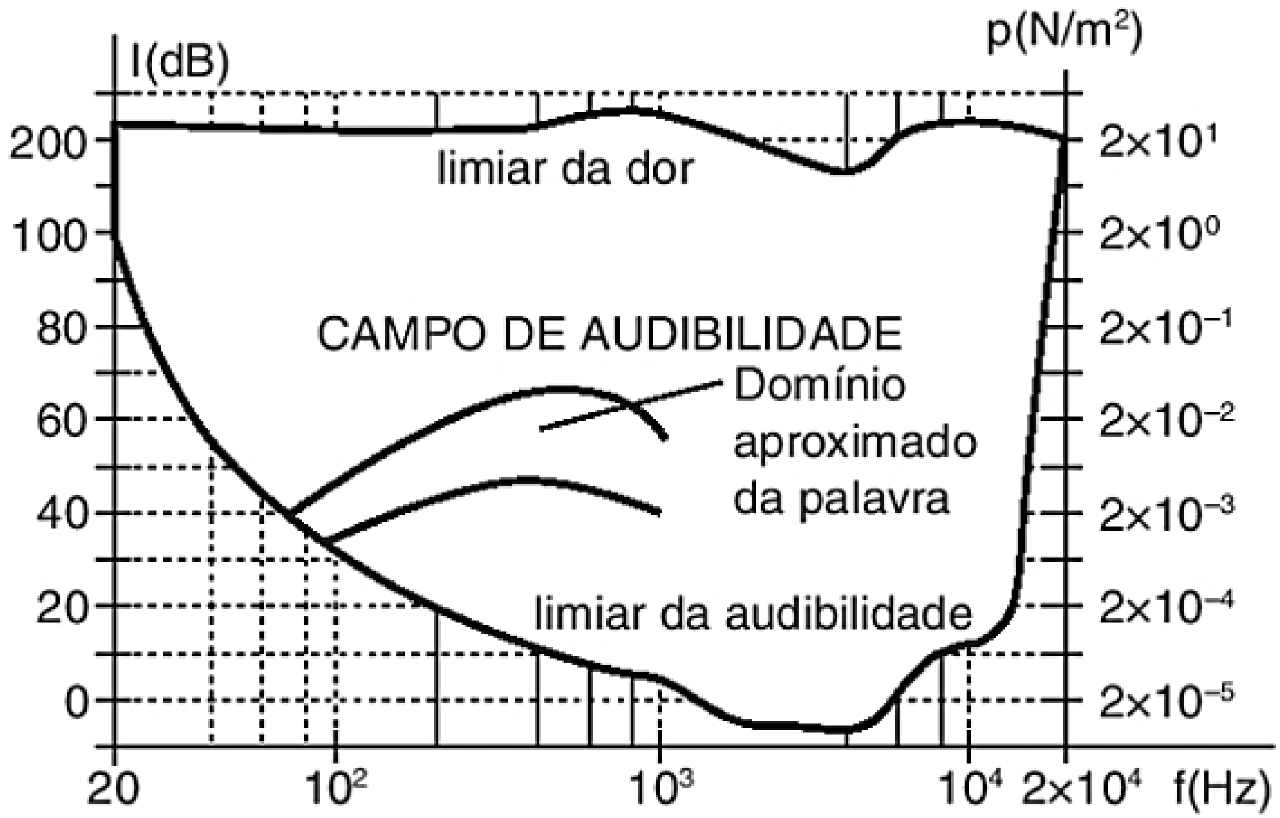


FIGURA 4.16

Gráfico mostrando campo de audibilidade de uma pessoa normal.

Fonte: Duran. Pearson, 2ª ed., 2011.

Sistemas vibrantes

Instrumentos musicais

Sistema vibrante da corda fixa

- Está presente em **instrumentos musicais de cordas**;
- As **cordas vibram** ao serem tocadas e produzem **ondas transversais estacionárias** que funcionam como **fonte das ondas**;

Sistema vibrante da corda fixa

- Está presente em **instrumentos musicais de cordas**;
- As **cordas vibram** ao serem tocadas e produzem **ondas transversais estacionárias** que funcionam como **fonte das ondas**;
- Ao oscilarem as **cordas fazem vibrar o ar** em torno e geram **ondas sonoras de mesma frequência**;

Sistema vibrante da corda fixa

- Como as extremidades estão fixas, estas são nós naturais. Em consequência somente **alguns comprimentos de onda estacionária são possíveis:**

Sistema vibrante da corda fixa

- Como as extremidades estão fixas, estas são nós naturais. Em consequência somente **alguns comprimentos de onda estacionária são possíveis:**

$$\boxed{\lambda_n = \frac{2L}{n}} \qquad com\; n = 1, 2, 3\; \ldots$$

$\boldsymbol{L}$: comprimento total da corda;

$\boldsymbol{\lambda_n}$: comprimento de onda $\boldsymbol{n}$.

Sistema vibrante da corda fixa

- Como:

$$v = \lambda f \quad e \quad \lambda_n = \frac{2L}{n} \quad \rightarrow \quad \boxed{f_n = \frac{nv}{2L}}$$

Sistema vibrante da corda fixa

- Como:

$$v = \lambda f \quad e \quad \lambda_n = \frac{2L}{n} \quad \rightarrow \quad \boxed{f_n = \frac{nv}{2L}}$$

- As possíveis frequências na corda esticada formam uma **sequência harmônica**. A **primeira frequência é a fundamental**;
- O **timbre de cada instrumento** de corda ao tocarem a mesma nota se **diferencia pela superposição das frequências harmônicas**.

Exemplo 15.3

Uma corda de **0,5 m** de comprimento está fixa nas duas extremidades, sob uma tensão de **18 N**. Se a densidade linear da corda for de **2.10^{-2} kg/m**. calcule:

a) A velocidade de oscilação na corda;

b) A frequência harmônica fundamental;

c) A frequência da segunda harmônica.

Sistema vibrante coluna de ar no interior de um tubo

- Um **tubo preenchido com um fluido** pode produzir vibrações cujas frequências são múltiplas de uma frequência fundamental;
- As frequências são determinadas pela **forma e comprimento da cavidade**;

Sistema vibrante coluna de ar no interior de um tubo

- Um **tubo preenchido com um fluido** pode produzir vibrações cujas frequências são múltiplas de uma frequência fundamental;
- As frequências são determinadas pela **forma e comprimento da cavidade**;
- Existem **dois tipos** básicos de tubos: **aberto em ambos os extremos** e **aberto somente em um deles.**

a) Tubo aberto em ambos os extremos

- A pressão nos extremos será a **pressão atmosférica**, sendo estes nós de pressão;
- Se a corrente de ar for dirigida a uma das extremidades **ondas longitudinais estacionárias** serão criadas;

a) Tubo aberto em ambos os extremos

- A pressão nos extremos será a **pressão atmosférica**, sendo estes nós de pressão;
- Se a corrente de ar for dirigida a uma das extremidades **ondas longitudinais estacionárias** serão criadas;
- As **frequências harmônicas são obtidas pela mesma equação da corda fixa**:

$$\boxed{f_n = \frac{nv}{2L}} \qquad com\ n = 1, 2, 3\ \ldots$$

$\boldsymbol{L}$: comprimento total do tubo;

b) Tubo aberto em um dos extremos

- A **pressão no extremo aberto é a atmosférica**. No **outro extremo á pressão será máxima**;

b) Tubo aberto em um dos extremos

- A **pressão no extremo aberto é a atmosférica**. No **outro extremo á pressão será máxima**;
- Os possíveis comprimentos de onda de pressão e as frequências harmônicas são:

$$\boxed{\lambda_m = \frac{4L}{m}} \qquad com \quad m = 1, 3, 5, 7 \ldots$$

$$\boxed{f_m = \frac{mv}{4L}}$$

$\boldsymbol{L}$: comprimento total do tubo;

Ressonância

- Processo de **transferência de energia** de um sistema que oscila para outro que possui a **mesma frequência de oscilação**;

Ressonância

- Processo de **transferência de energia** de um sistema que oscila para outro que possui a **mesma frequência de oscilação**;
- **Pode ocorrer** em diferentes situações que envolvem algum tipo de **movimento periódico** tais como: **mecânicos**, **acústicos**, **ópticos** e **elétricos**;

Ressonância

- Processo de **transferência de energia** de um sistema que oscila para outro que possui a **mesma frequência de oscilação**;
- **Pode ocorrer** em diferentes situações que envolvem algum tipo de **movimento periódico** tais como: **mecânicos**, **acústicos**, **ópticos** e **elétricos**;
- Um dos usos mais conhecidos são as **caixas de ressonância de instrumentos acústicos**, como o violão.

Ressonância

- Quando ocorre a ressonância há um **aumento na amplitude** de uma das frequências naturais de oscilação;

Ressonância

- Quando ocorre a ressonância há um **aumento na amplitude** de uma das frequências naturais de oscilação;
- Uma **orquestra ao ser afinada gradativamente tem a intensidade do som sendo aumentada pela ressonância**;

Ressonância

- Quando ocorre a ressonância há um **aumento na amplitude** de uma das frequências naturais de oscilação;
- Uma **orquestra ao ser afinada gradativamente tem a intensidade do som sendo aumentada pela ressonância**;
- Para um tubo fechado, na primeira ressonância:

$$\boxed{\lambda_1 = 4L_1} \quad e \quad \boxed{f = \frac{v}{4L_1}}$$

$\boldsymbol{L_1}$: comprimento da coluna de ar;

Exemplo

O **canal auditivo do ouvido humano** é um tubo fechado na extremidade interna pelo tímpano e na outra extremidade um tubo aberto. O canal tem cerca de **2,5 cm de extensão** e está preenchido com ar. Considere a **velocidade** no ar de **344 m/s** e calcule a frequência fundamental para qual o ouvido é mais sensível. Ou seja, **a frequência de ressonância**. Resposta: $f_1 = 3440\ Hz$

Para depois desta aula

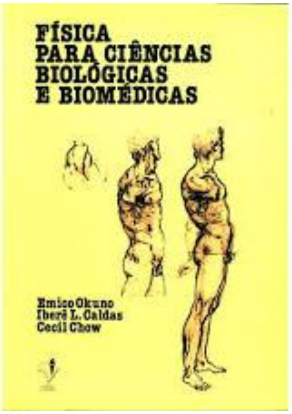
- Completar estudo com a leitura do capítulo 14 e 15 do livro texto (Okuno);
- Acessar Lista 08 no site:

profhenriquefaria.com

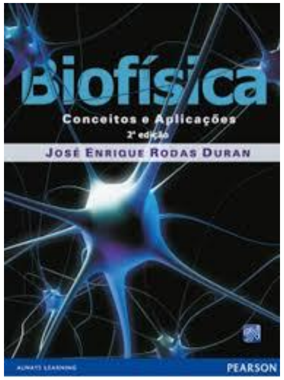
Obrigado pela atenção!

E bons estudos.

Referências



Okuno, E. Caldas, I. L. Chow, C. **Física para Ciências Biológicas e Biomédicas.** São Paulo: Harbra, 1986. (Capítulo 14 e 15)



DURAN, J.E.R. **Biofísica. Fundamentos e Aplicações, 2ª Ed.** São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011. (Capítulo 10.5)