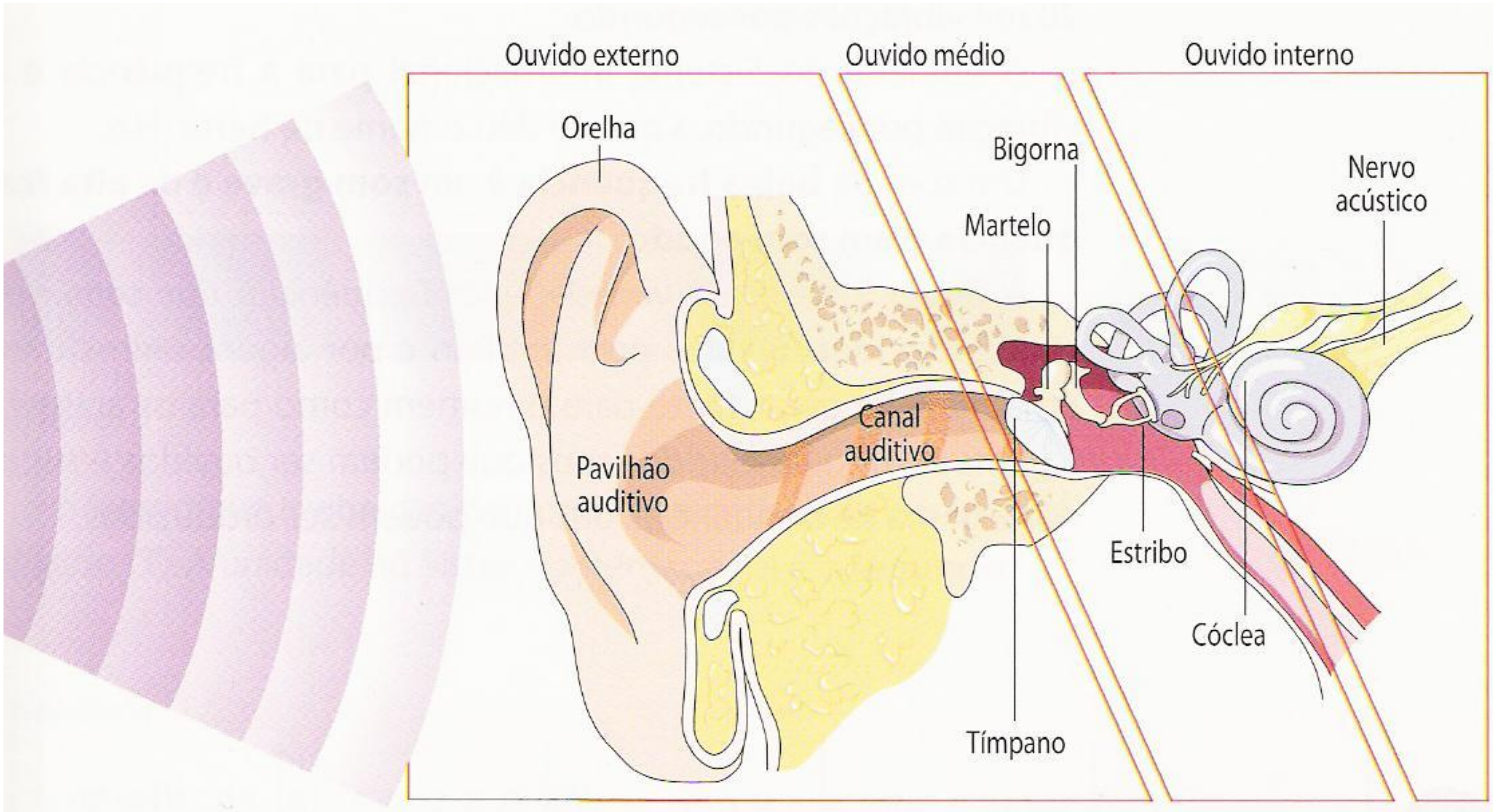
F-106 Fundamentos de Física para Biologia

Oscilações, Ondas, Audição e Fala

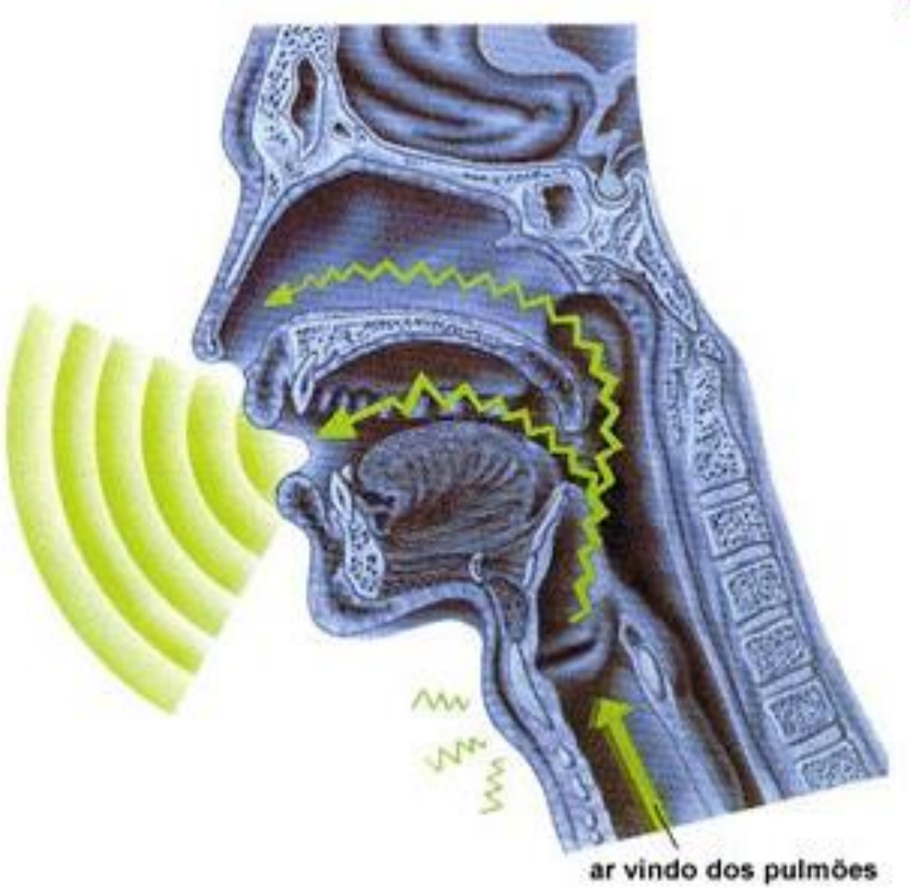
Introdução

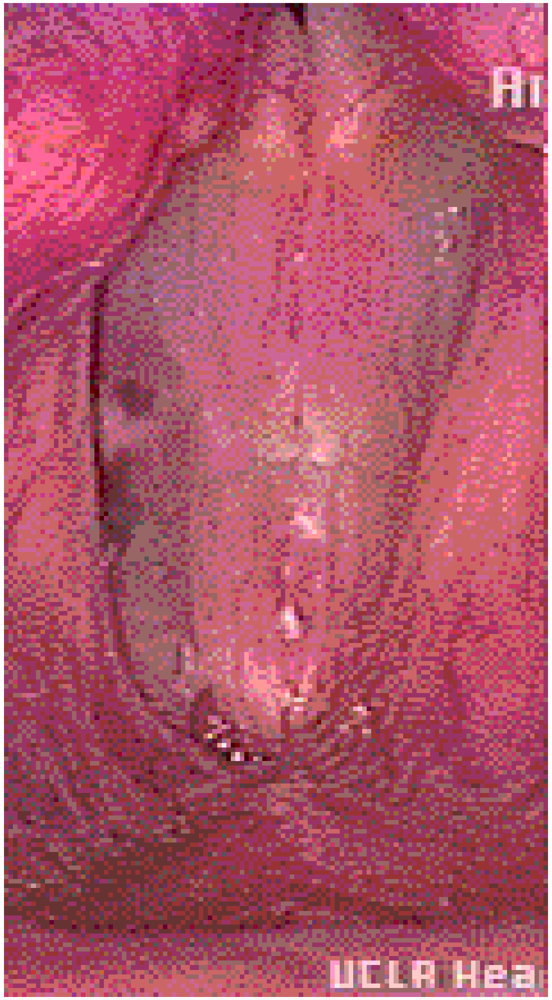
Audição



Introdução

A Fala





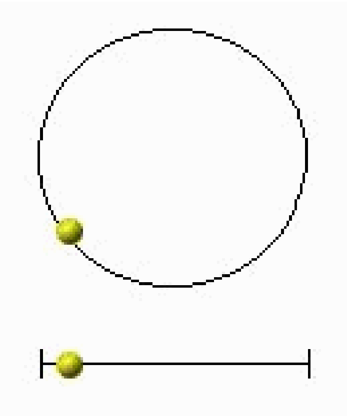
Introdução

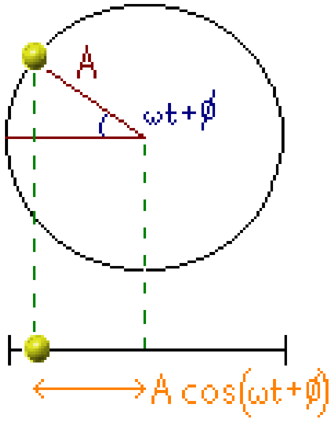
A Ciência do Som...

A acústica tem se tornado uma área interdisciplinar interagindo fortemente com disciplinas como física, engenharia, psicologia, fisiologia, fonoaudiologia, arquitetura, etc.

Entre as diversas sub-áreas às quais a acústica se dedica podemos citar: a acústica de ambientes, a acústica musical, a psicoacústica, o controle de ruídos – poluição sonora, a acústica musical, entre outras...

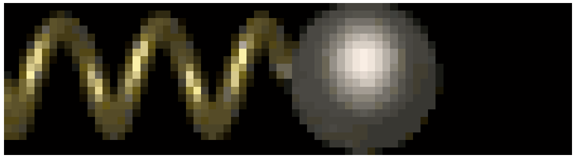
Introdução

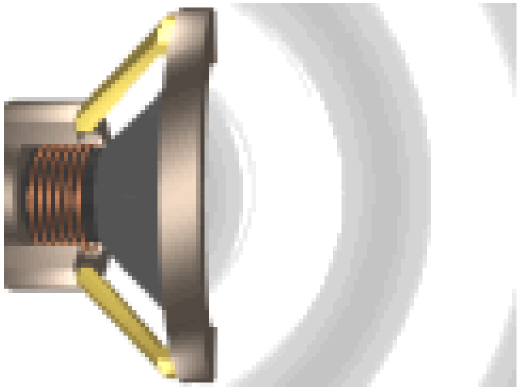


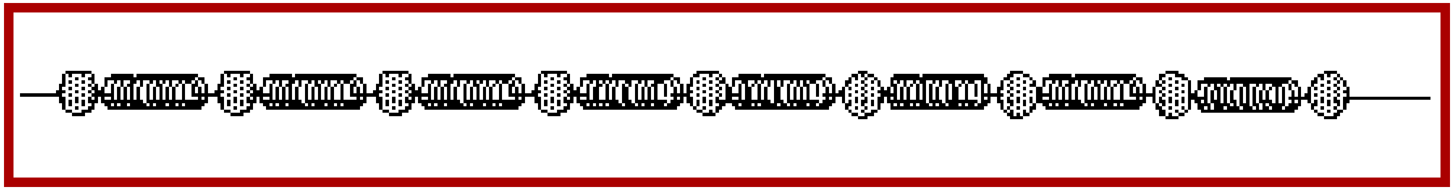


O que é o som?

O som propaga-se no ar através de um movimento ordenado das partículas que o constituem.







Introdução

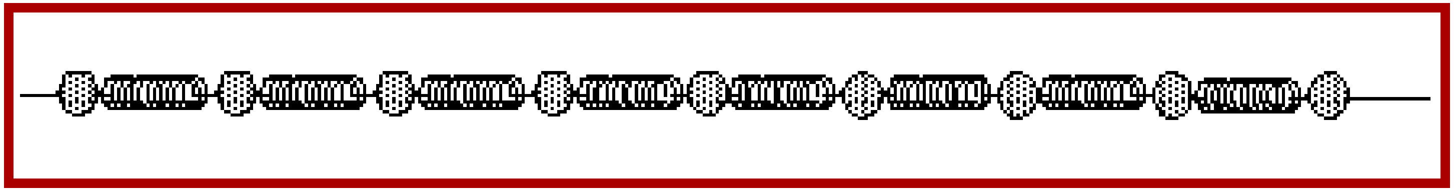
O que é o som?

Física	Psicologia
Som é uma onda de pressão longitudinal	Som é uma sensação enviada para o cérebro pelo mecanismo auditivo
Objetiva	Subjetiva
Fácil de medir	Difícil de medir

A sensação sonora é causada por uma variação de pressão

Introdução

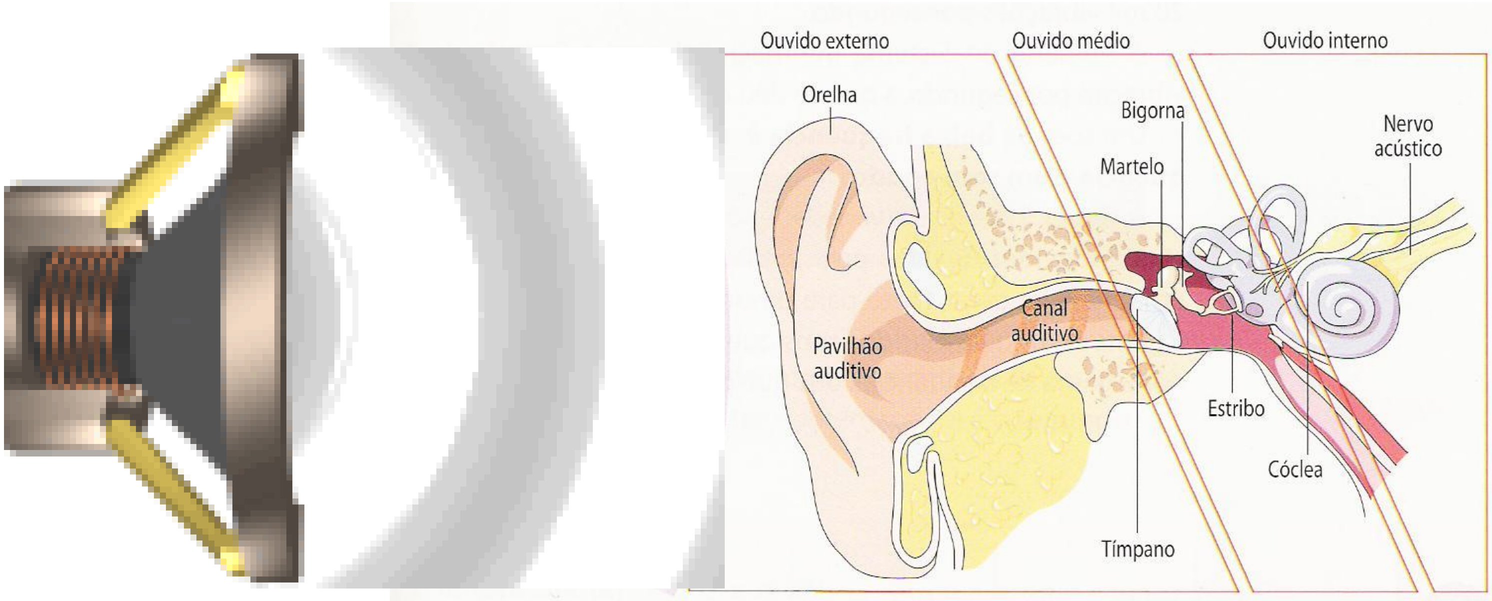
Nosso mundo está repleto de oscilações, nas quais os objetos se movem de um lado para o outro.



Por fenômeno oscilatório estamos considerando tudo aquilo que se move em dois sentidos de forma alternada em torno de uma posição de equilíbrio.

Nosso interesse está em sistemas oscilatórios periódicos (ou seja, cujos ciclos se repetem em intervalos iguais de tempo) ocasionados por forças restauradoras para um certo estado ou posição de equilíbrio.

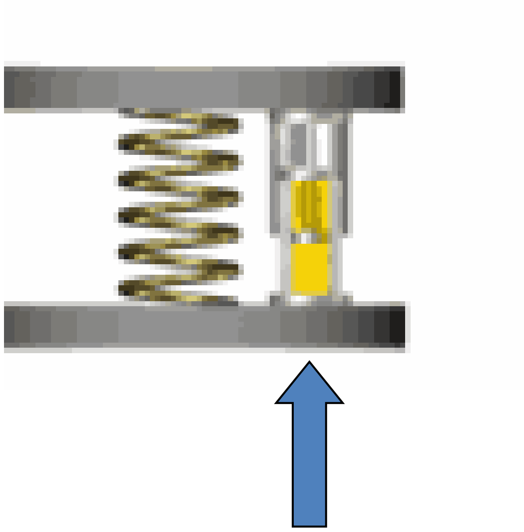
Introdução



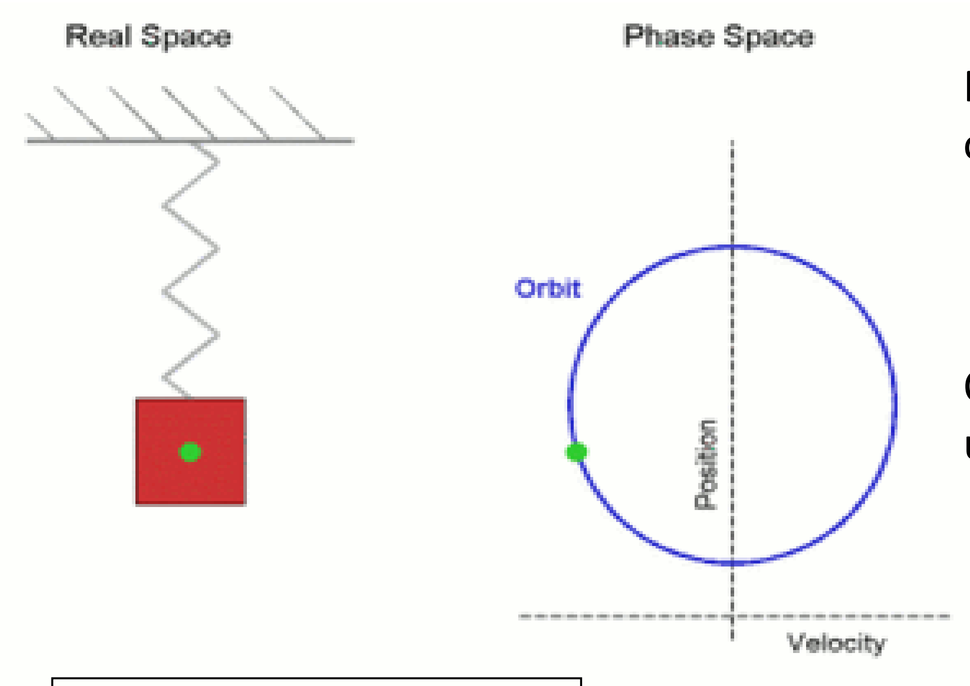
A nossa visão e audição, juntamente com a voz, que constituem nossos principais meios para comunicação, acontecem por meio de fenômenos oscilatórios

Introdução

Sempre que um sistema sofre uma perturbação da sua posição de equilíbrio estável, ocorre um movimento de oscilação.



Movimento Harmônico Simples



Frequência (f) – é o número de oscilações completas por segundo.

1 hertz = 1 Hz = 1 s^{-1}

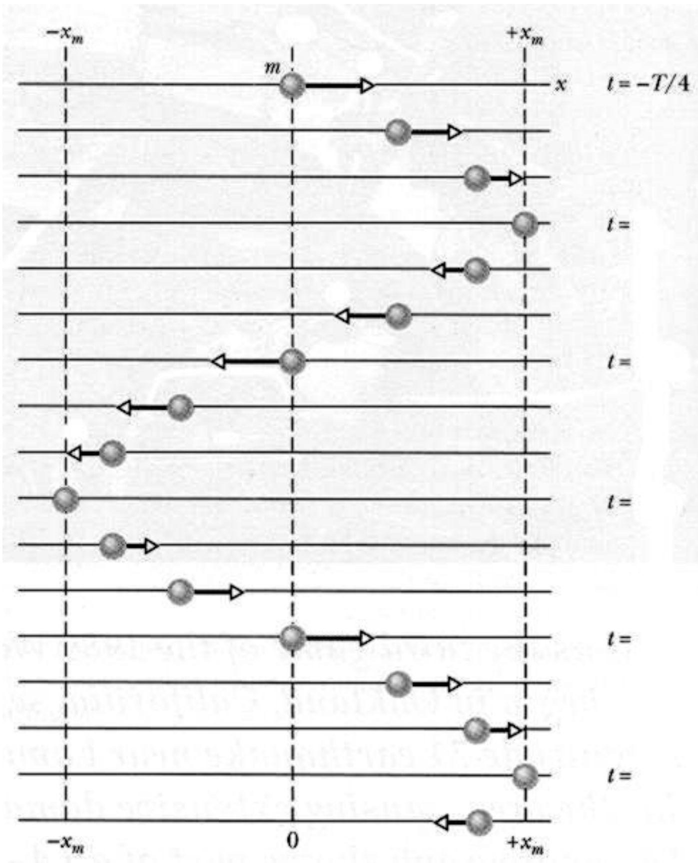
O tempo necessário para completar uma oscilação é o período:

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

Todo movimento que se repete a intervalos regulares é chamado de movimento periódico ou harmônico.

O movimento harmônico simples é aquele que ocorre quando a aceleração e a força resultante são proporcionais e se opõem ao deslocamento.

Movimento Harmônico Simples



Deslocamento no instante t

Fase

$$x(t) = x_m \cos\big(\underbrace{\omega t + \phi}_{\text{Fase}}\big)$$

Amplitude

Frequência Angular

Tempo

Constante de fase ou Ângulo de fase

Movimento Harmônico Simples

Para interpretar a constante ω, denominada frequência angular do movimento, notamos primeiramente que o deslocamento x(t) deve ser igual a x(t + T), para qualquer valor de t. Desta forma:

$$x_m \cos \omega t = x_m \cos \omega (t + T)$$

O cosseno se repete quando seu argumento aumenta de 2π rad.

$$\omega(t + T) = \omega t + 2\pi \Rightarrow \omega T = 2\pi$$

Frequência Angular →

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

Velocidade e Aceleração do MHS

A velocidade é a variação da posição no tempo; ou seja, a taxa de variação ou derivada da função posição x(t):

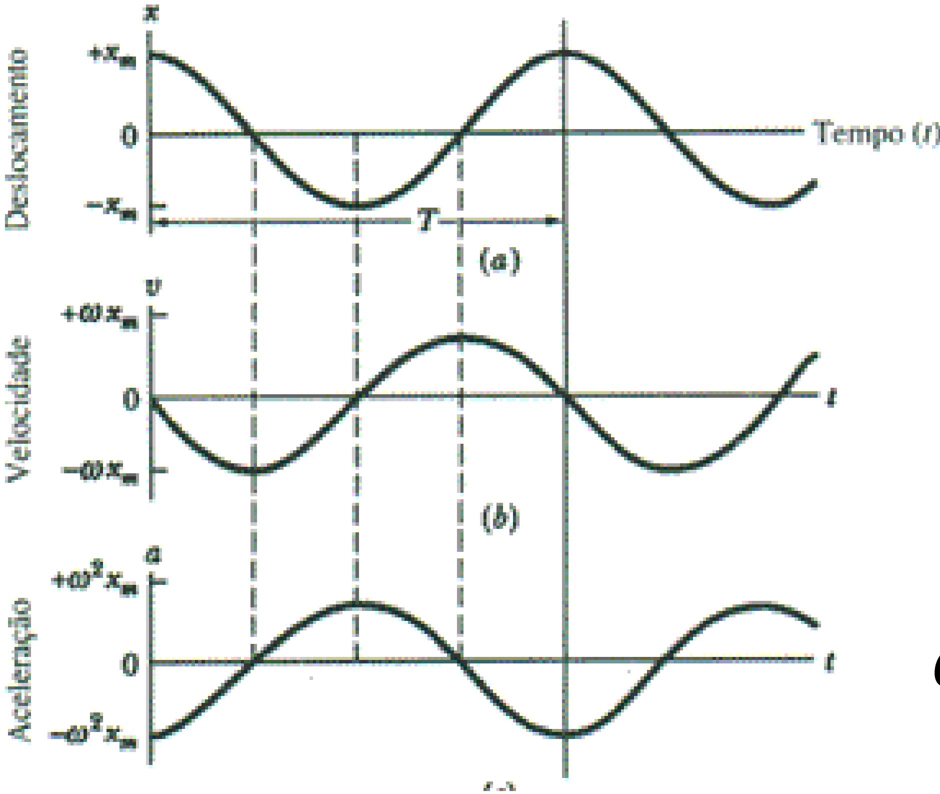
$$v(t) = \frac{dx(t)}{dt} = \frac{d}{dt}\left[x_m \cos(\omega t + \phi)\right] \Rightarrow v(t) = -\omega x_m sen(\omega t + \phi)$$

A aceleração é a variação da velocidade no tempo; ou seja, a taxa de variação ou derivada da função velocidade v(t):

$$a(t) = \frac{dv(t)}{dt} = \frac{d}{dt}\left[-\omega x_m sen(\omega t + \phi)\right] \Rightarrow a(t) = -\omega^2 \underbrace{x_m \cos(\omega t + \phi)}_{x(t)}$$

$$\boxed{a(t) = -\omega^2 x(t)}$$

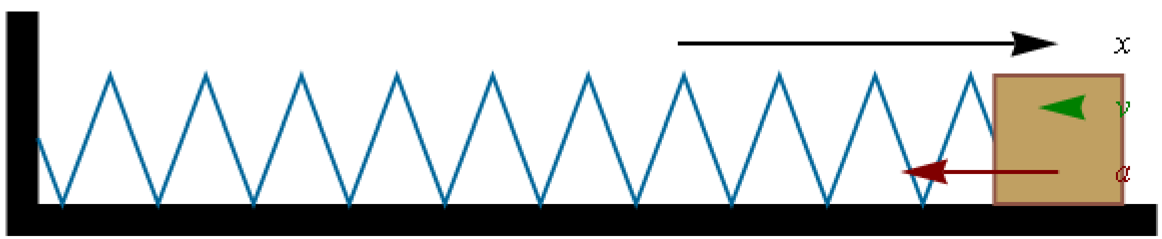
Gráficos de x(t), v(t) e a(t)



$$x(t) = x_m \cos(\omega t + \phi)$$

$$v(t) = -\omega x_m \sin(\omega t + \phi)$$

$$a(t) = -\omega^2 x_m \cos(\omega t + \phi)$$



Movimento Harmônico Simples

Considerando a 2ª Lei de Newton e a Lei de Hooke, teremos:

$$\underbrace{F = ma = -(m\omega^2)x \qquad F = -kx}$$

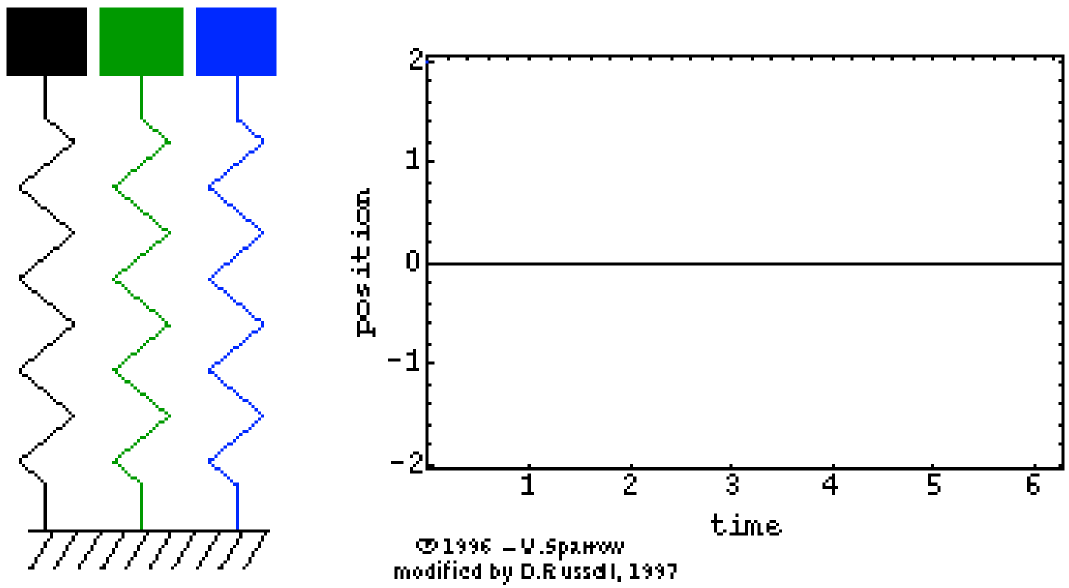
$$k = m\omega^2 \Rightarrow \boxed{\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}}$$

$$\boxed{T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}}$$

Movimento Harmônico Simples

Dependência de ω:

- com a massa – depende
- com a constante k – depende
- com a amplitude – não depende



A Energia do MHS

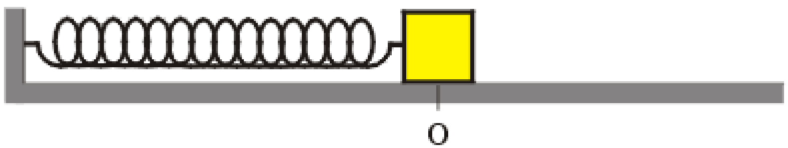
Energia Potencial $$U(t) = \frac{1}{2}kx^2 = \frac{1}{2}kx_m \cos^2(\omega t + \phi)$$

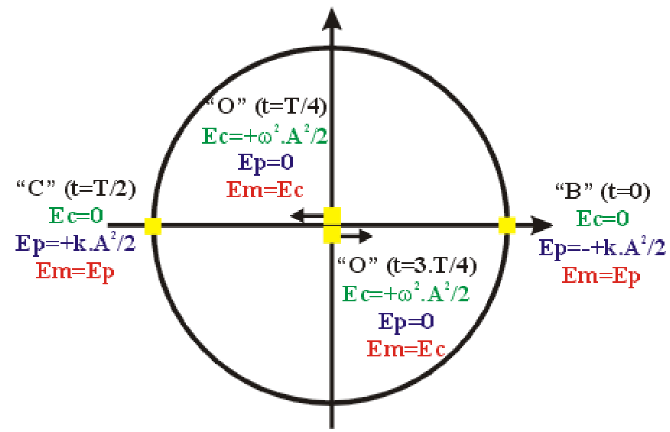
Energia Cinética
$$K(t) = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m\omega^2 x_m^2 sen^2(\omega t + \phi)$$
$$K(t) = \frac{1}{2}kx_m^2 sen^2(\omega t + \phi)$$

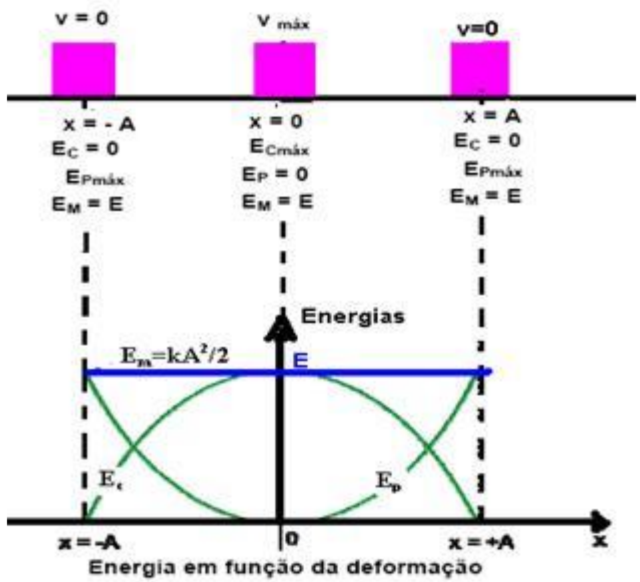
Lembrando que $\cos^2\alpha + sen^2\alpha = 1$ teremos

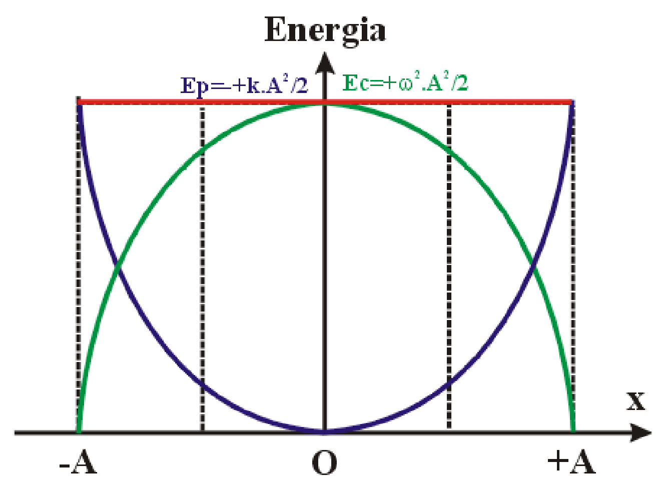
$$\boxed{E = U + K = \frac{1}{2}kx_m^2}$$

A Energia do MHS

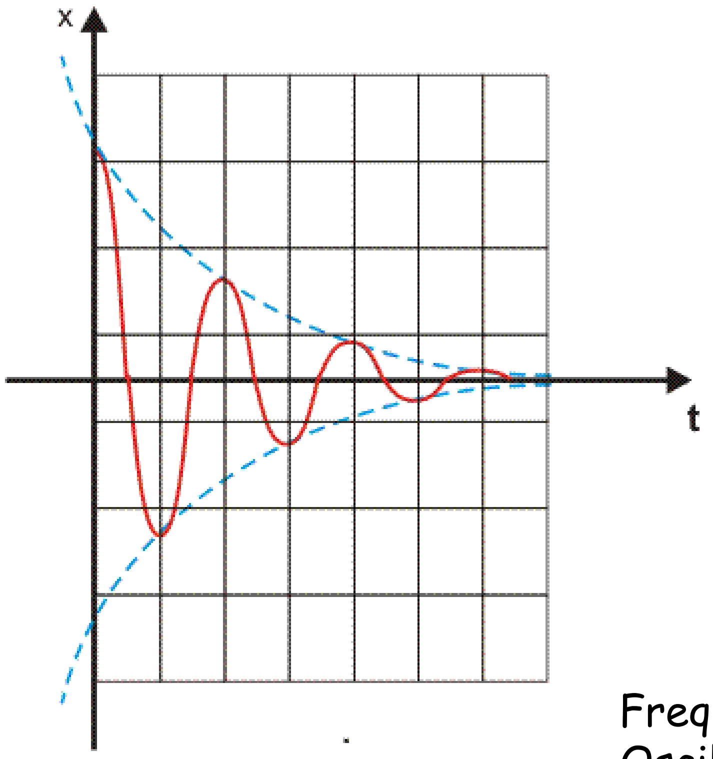








Movimento Harmônico Simples Amortecido



Que resulta na equação diferencial

$$m\frac{d^2x}{dt^2}+b\frac{dx}{dt}+kx=0$$

A solução desta equação é

$$\boxed{x(t)=x_m e^{-bt/2m}\cos(\omega' t+\phi)}$$

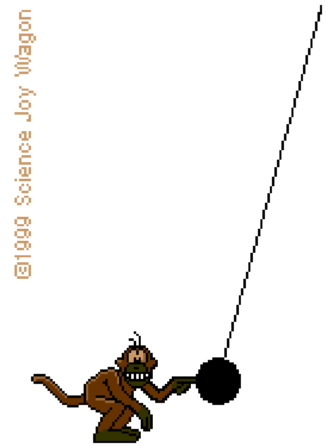
Frequência do
Oscilador Amortecido

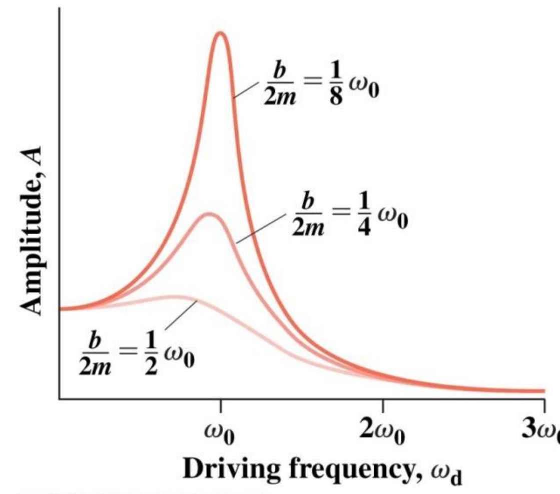
$$\omega'=\sqrt{\frac{k}{m}-\frac{b^2}{4m^2}}$$

Se o amortecimento é pequeno

$$E(t)\approx\frac{1}{2}kx_m^2 e^{-bt/m}$$

Oscilações Forçadas e Ressonância





Temos que resolver a equação:

$$\boxed{ma = -kx - bv + F(t)}$$

$$m\frac{d^2x}{dt^2} + b\frac{dx}{dt} + kx = F_0 \cos\omega_D t \quad \Rightarrow \quad x(t) = x_m \cos(\omega_D t + \phi)$$

Depende de ω e ω_D

Oscilações Forçadas e Ressonância

Caso mais simples → $$m\frac{d^2x}{dt^2}+kx=F_0\cos\omega_D t$$

Esta equação tem como possível solução: $$\boxed{x(t)=x_m\cos(\omega_D t+\phi)}$$

onde

$$x_m=\frac{F_0}{m\left|\omega_0^2-\omega_D^2\right|}$$

e

$$\phi=0 \quad (\omega<\omega_0), \qquad \phi=-\pi \quad (\omega>\omega_0)$$

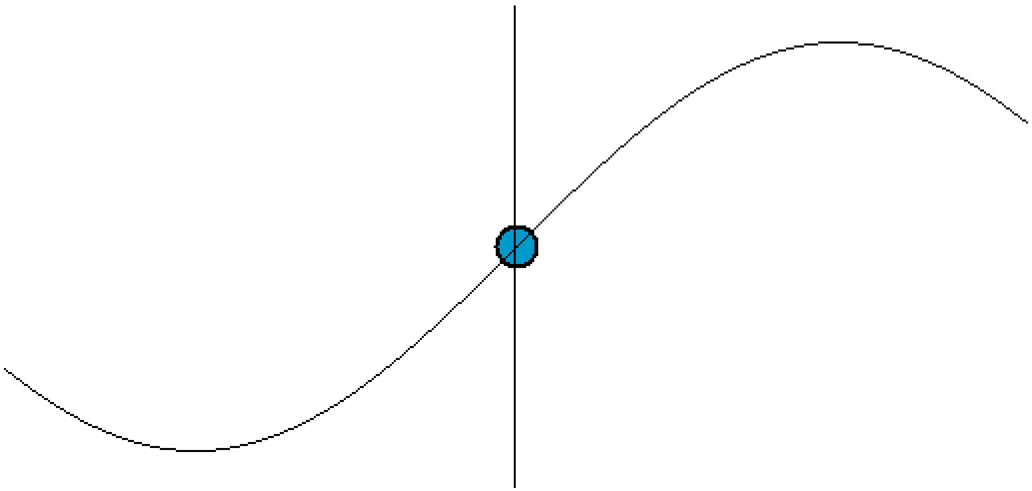
em fase   fora de fase

Oscilações Forçadas e Ressonância

A Tacoma Narrows Bridge foi construída nos anos 40. Esta belíssima obra caiu pouco tempo depois de ficar pronta. Por quê? A causa não foi nenhuma das que usualmente são as responsáveis por tais acidentes. Não foi um terremoto, nem uma inundação. Foi algo bem mais trivial. O grande responsável pela queda da belíssima ponte pênsil foi uma simples e leve brisa...

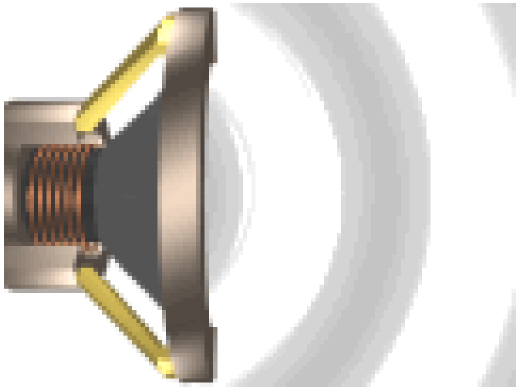
Oscilações Forçadas e Ressonância

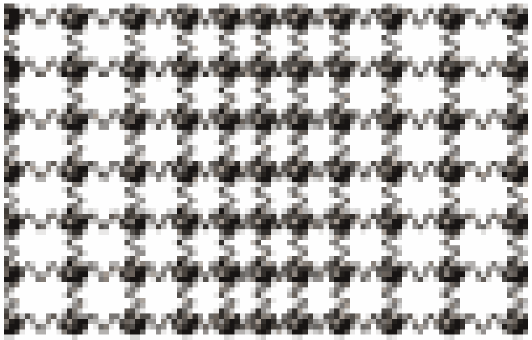
Ondas Transversais e Longitudinais



Onda Transversal – O deslocamento dos elementos é sempre perpendicular a direção de propagação...

Ondas Transversais e Longitudinais



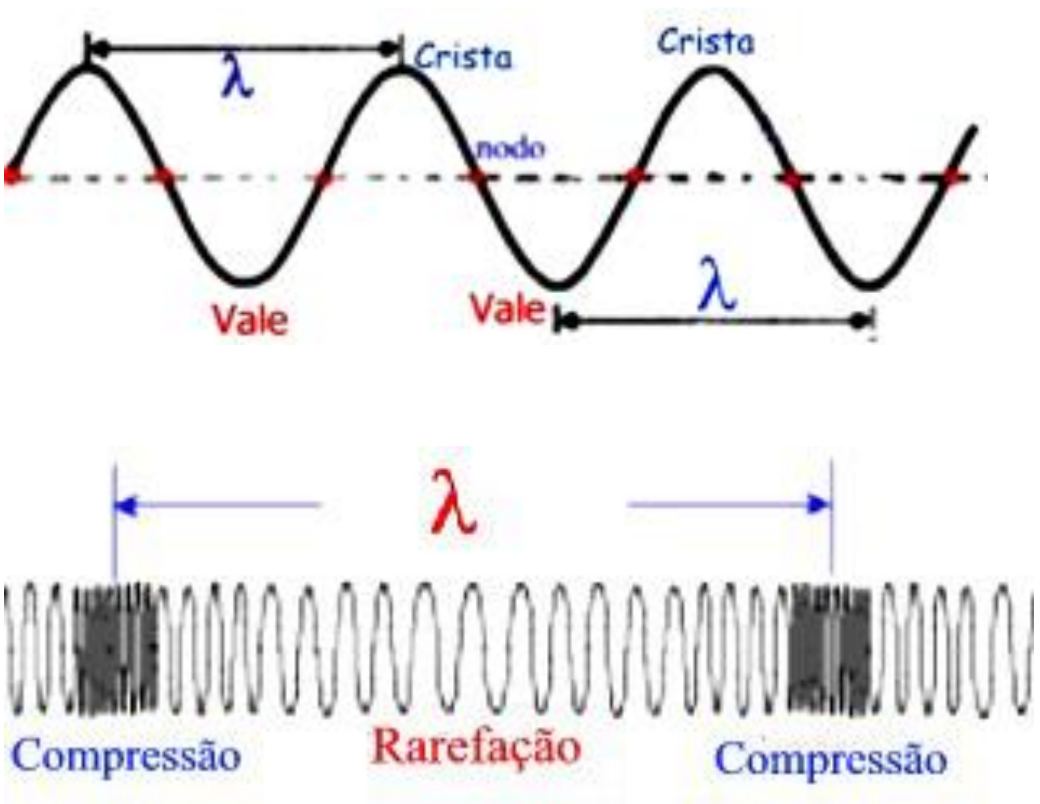


Onda Longitudinal – O deslocamento das moléculas de ar é paralelo à direção de propagação da onda...

Comprimento de Onda e Frequência

$$\overbrace{y(x,t)}^{\text{Deslocamento}} = \overbrace{y_m}^{\text{Amplitude}}\,\overbrace{sen(\overbrace{\underset{\text{Número de Onda}}{k}\,\underset{\text{Posição}}{x} - \underset{\text{Freqüência Angular}}{\omega}\,\underset{\text{Tempo}}{t}}^{\text{Fase}})}^{\text{Fator Oscilatório}}$$

Comprimento de Onda e Frequência



Comprimento de Onda e Frequência

Número de Onda ⟹ $$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

Frequência Angular ⟹ $$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

Período T – tempo que um elemento leva para realizar uma oscilação completa

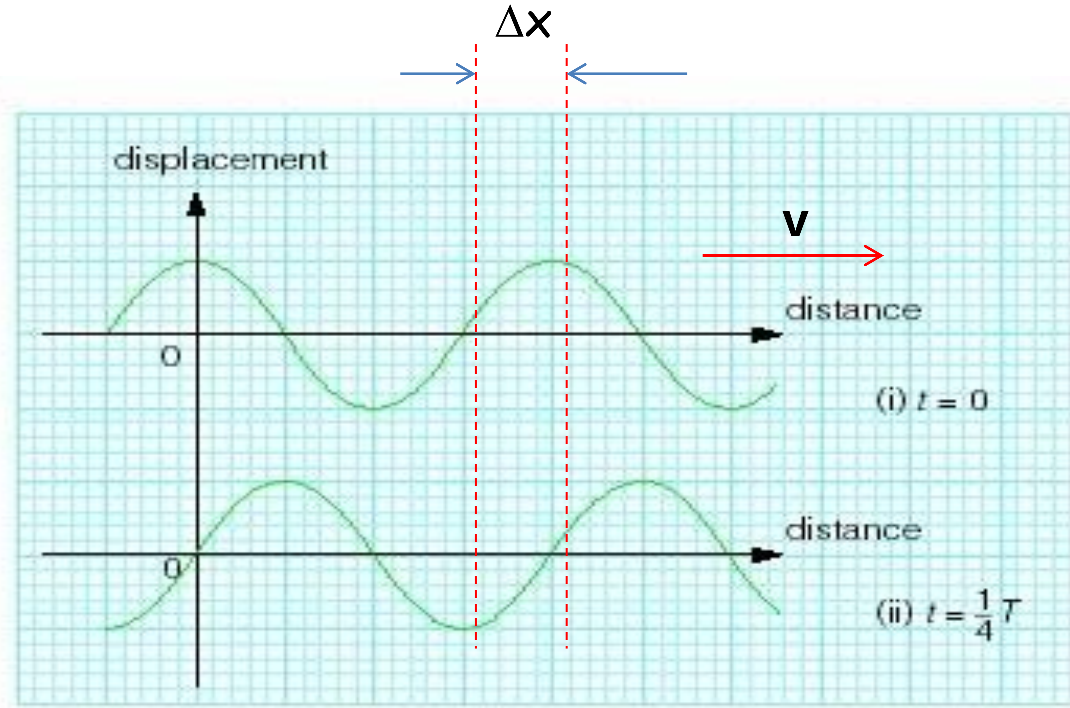
Frequência ⟹ $$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}$$

Forma Geral

$$\boxed{y(x,t) = y_m sen(kx - \omega t + \phi)}$$

Constante de Fase

Velocidade de uma Onda Progressiva



$$kx-\omega t = constante$$

$$k\frac{dx}{dt}-\omega = 0$$

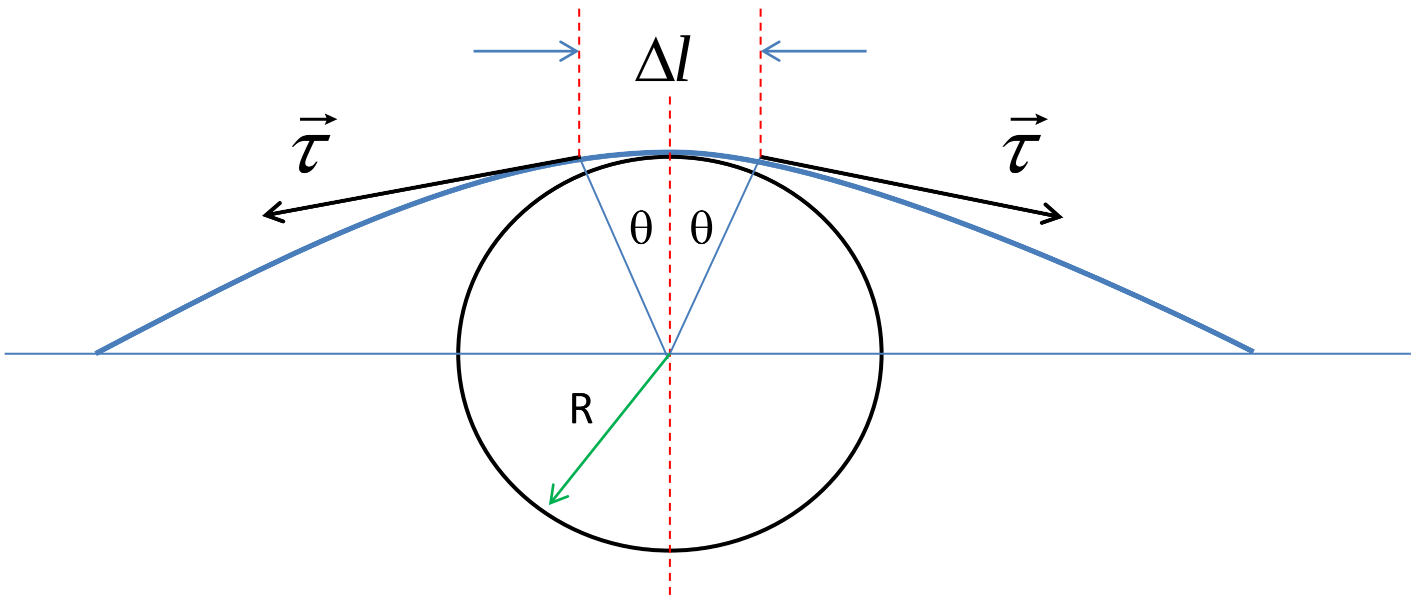
$$\frac{dx}{dt} = v = \frac{\omega}{k}$$

$$\boxed{v = \frac{\omega}{k} = \frac{\lambda}{T} = \lambda f}$$

$$y(x,t) = y_m sen(kx-\omega t)$$ Se propaga no sentido positivo de x

$$y(x,t) = y_m sen(kx+\omega t)$$ Se propaga no sentido negativo de x

Velocidade da Onda em uma Corda Esticada



Velocidade da Onda em uma Corda Esticada

As componentes horizontais se cancelam, mas as verticais se somam

$$F = 2(\tau sen\theta) \approx \tau(2\theta) = \tau\frac{\Delta l}{R}$$

A massa do elemento é dada por $\Delta m = \mu\Delta l$

Ele possui uma aceleração em direção ao centro do círculo $a = \frac{v^2}{R}$

Usando a 2ª Lei de Newton

$$\frac{\tau\Delta l}{R} = (\mu\Delta l)\frac{v^2}{R}$$

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

Conclusões?

Energia e Potência de uma Onda Progressiva

F106 – Fundamentos de Física para Biologia

Energia cinética $dK = \frac{1}{2} dmu^2$ Onde u é a velocidade transversal

$$u = \frac{\partial y}{\partial t} = -\omega y_m \cos(kx - \omega t)$$

Fazendo $dm = \mu dx$ $\Rightarrow$ $dK = \frac{1}{2}(\mu dx)(-\omega y_m)^2 \cos^2(kx - \omega t)$

Dividindo por dt $\Rightarrow$ $\frac{dK}{dt} = \frac{1}{2}\mu v \omega^2 y_m^{\ 2} \cos^2(kx - \omega t)$

A taxa média de transporte de energia será

$$\left[\frac{dK}{dt}\right]_{méd} = \frac{1}{2}\mu v \omega^2 y_m^{\ 2}\left[\cos^2(kx - \omega t)\right]_{méd} = \frac{1}{4}\mu v \omega^2 y_m^{\ 2}$$

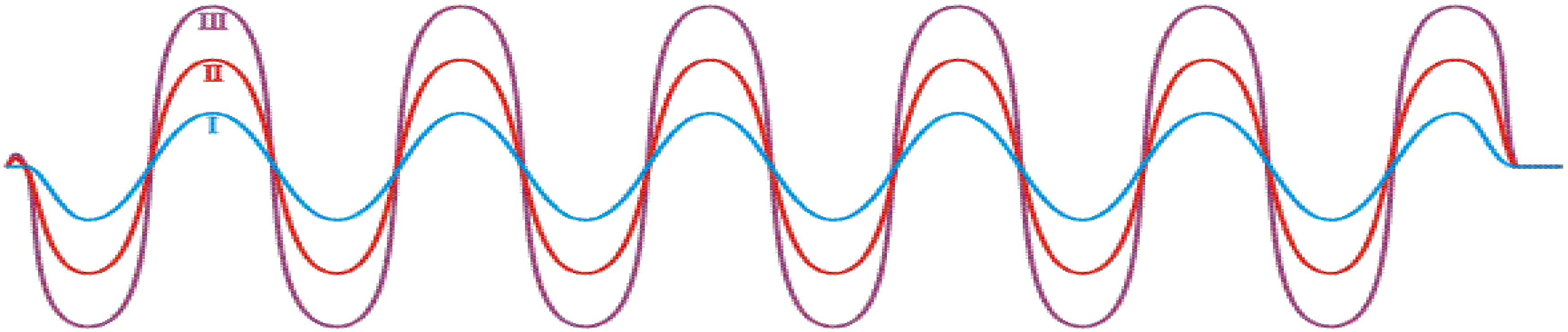
E a potência média $\boxed{P_{méd} = 2\left[\frac{dK}{dt}\right]_{méd} = \frac{1}{2}\mu v \omega^2 y_m^{\ 2}}$

Princípio de Superposição

$$y'(x,t) = y_1(x,t) + y_2(x,t)$$

Ondas superpostas se somam algebricamente para produzir uma onda resultante

Ondas superpostas não se afetam mutuamente



Interferência

$$y_1(x,t) = A\sin(kx - \omega t)$$

$$y_2(x,t) = A\sin(kx - \omega t + \phi)$$

$$y(x,t) = y_1(x,t) + y_2(x,t) = A\sin(kx - \omega t) + A\sin(kx - \omega t + \phi)$$

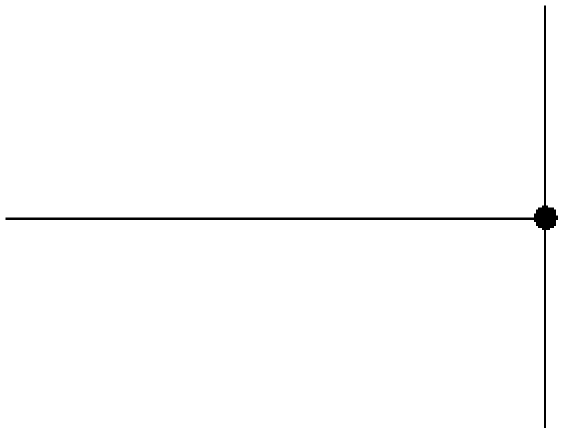
ϕ: Diferença de fase entre as ondas

$$sen\,a + sen\,b = 2\cos\left(\frac{a-b}{2}\right)\sin\left(\frac{a+b}{2}\right)$$

$$y(x,t) = 2A\cos\left(\frac{\phi}{2}\right)\sin\left(kx - \omega t + \frac{\phi}{2}\right)$$

Reflexão de ondas

- Cordas com uma extremidade fixa:
  - Pulso refletido retorna invertido com relação ao incidente



- Cordas com uma extremidade solta:
  - Pulso refletido retorna igual ao incidente.

Reflexão de ondas

- Reflexão em uma interface suave-dura

- Reflexão em uma interface dura-suave

Ondas Estacionárias

Se duas ondas senoidais de mesma amplitude e mesmo comprimento de onda se propagam em sentidos opostos em uma corda, a interferência mútua produz uma onda estacionária

$$y_1(x,t) = A\sin(kx - \omega t) \qquad y_2(x,t) = A\sin(kx + \omega t)$$

Usando o Princípio da Superposição e a relação

$$sen\,a + sen\,b = 2\cos\left(\frac{a-b}{2}\right)\sin\left(\frac{a+b}{2}\right)$$

$$\boxed{y(x,t) = 2A\sin(kx)\cos(\omega t)}$$

Ondas Estacionárias

Amplitude depende de x

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

Variação temporal

NÃO tem termo *(kx-ωt)* → NÃO é uma onda progressiva
→ É uma onda estacionária

Pontos de amplitude máxima

$$kx = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}, \frac{5\pi}{2}, \ldots = \left(n + \frac{1}{2}\right)\pi$$

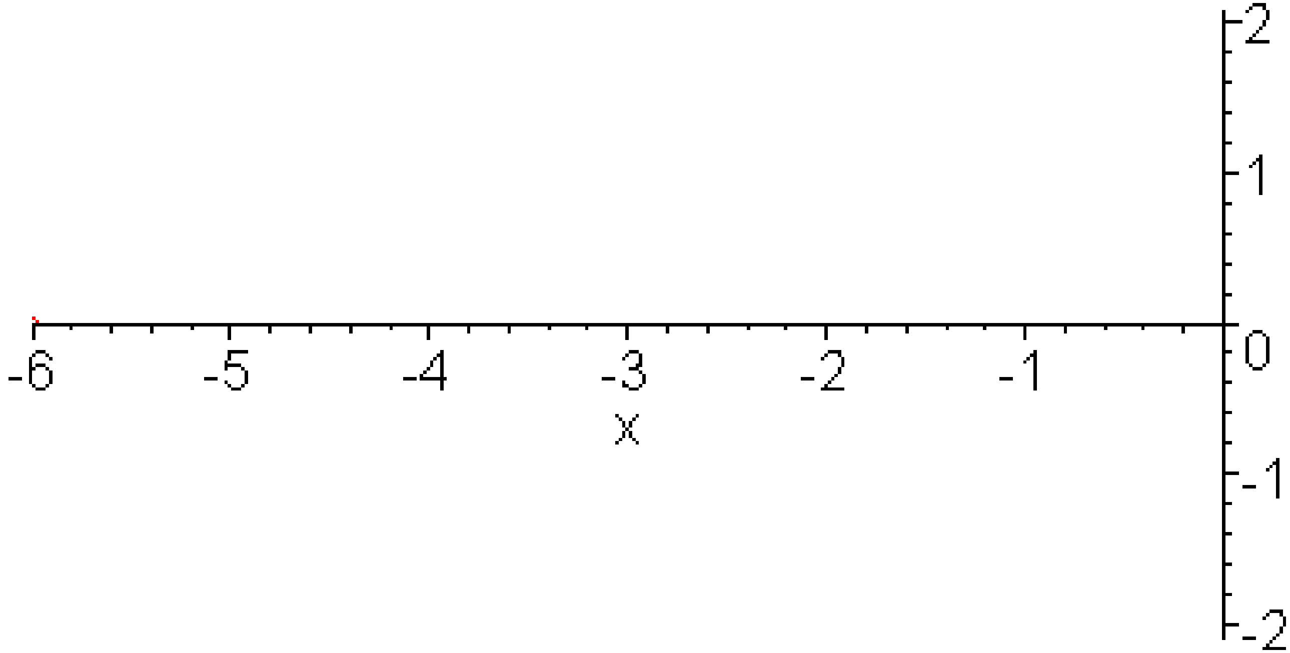
ANTI-NÓS

Pontos de amplitude zero

$$kx = 0, \pi, 2\pi, \ldots = n\pi$$

NÓS

Formação de Ondas Estacionárias

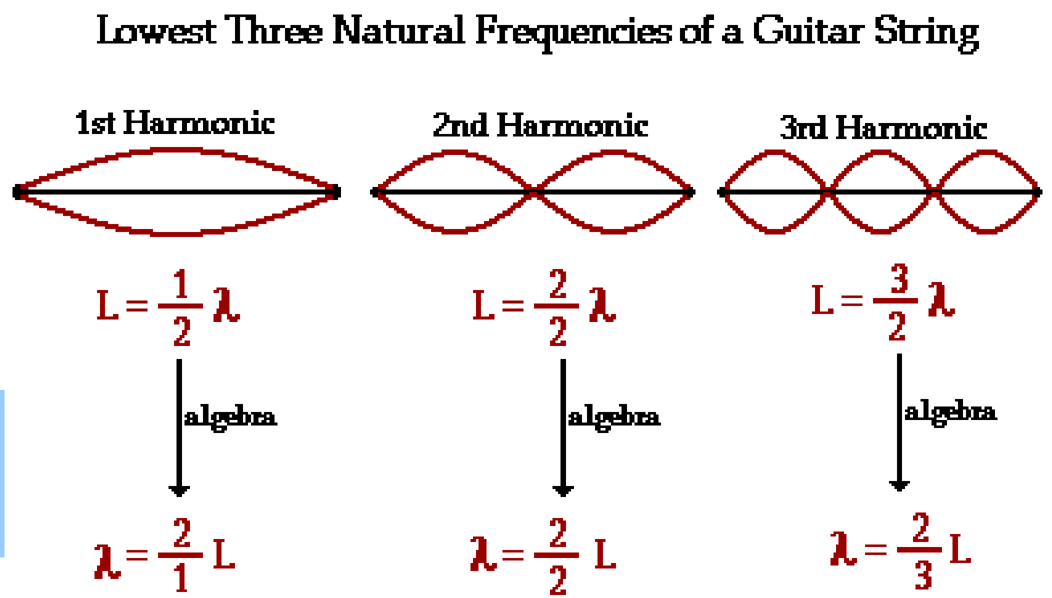


Ondas Estacionárias (Cordas)

Comprimentos de onda / Frequências ressonantes:

$$L = n\frac{\lambda}{2} \qquad n = 1, 2, 3, \ldots$$

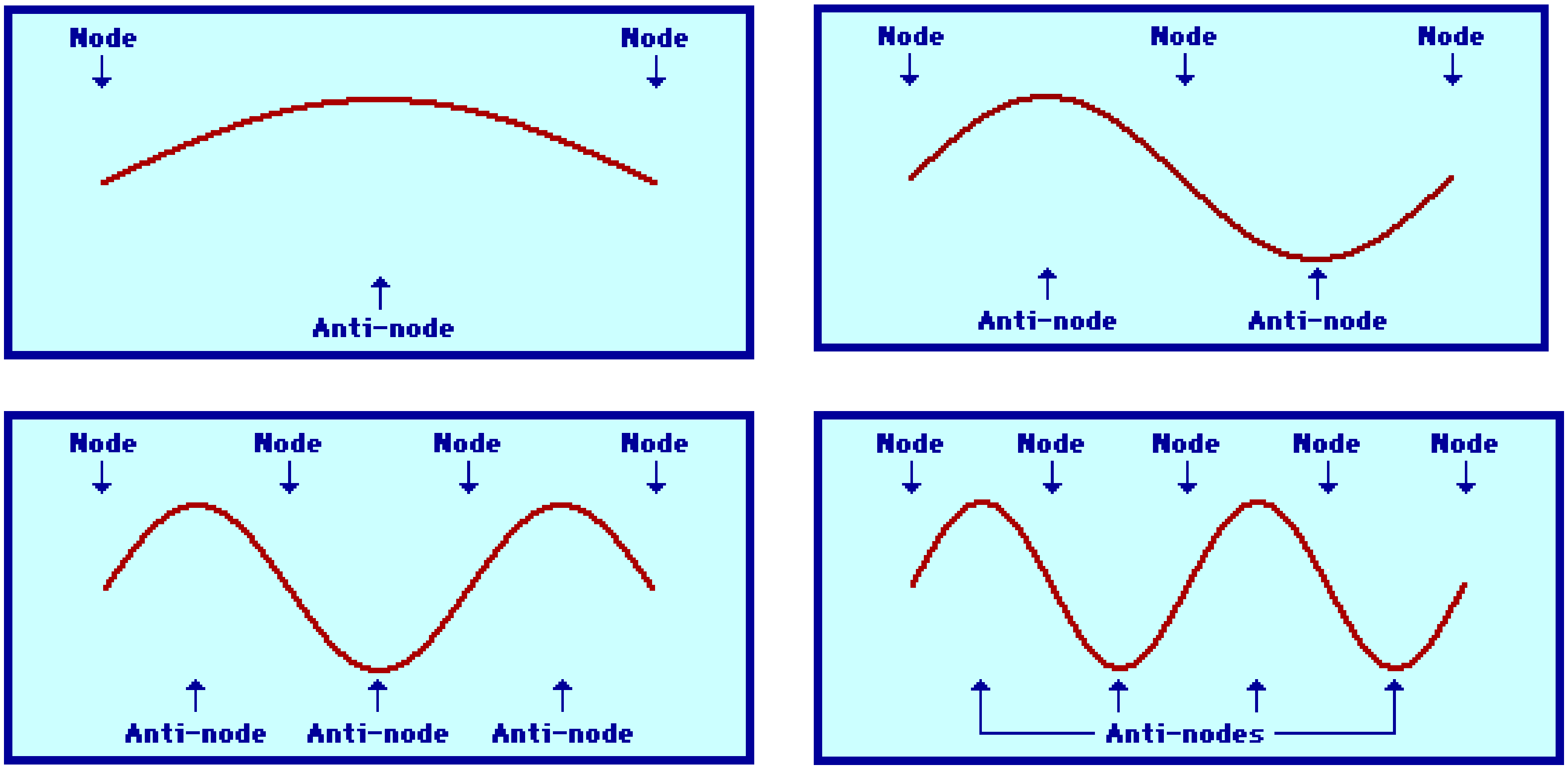
$$\lambda_n = \frac{2L}{n} \qquad f_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{nv}{2L}$$



Menor frequência: FREQUÊNCIA FUNDAMENTAL

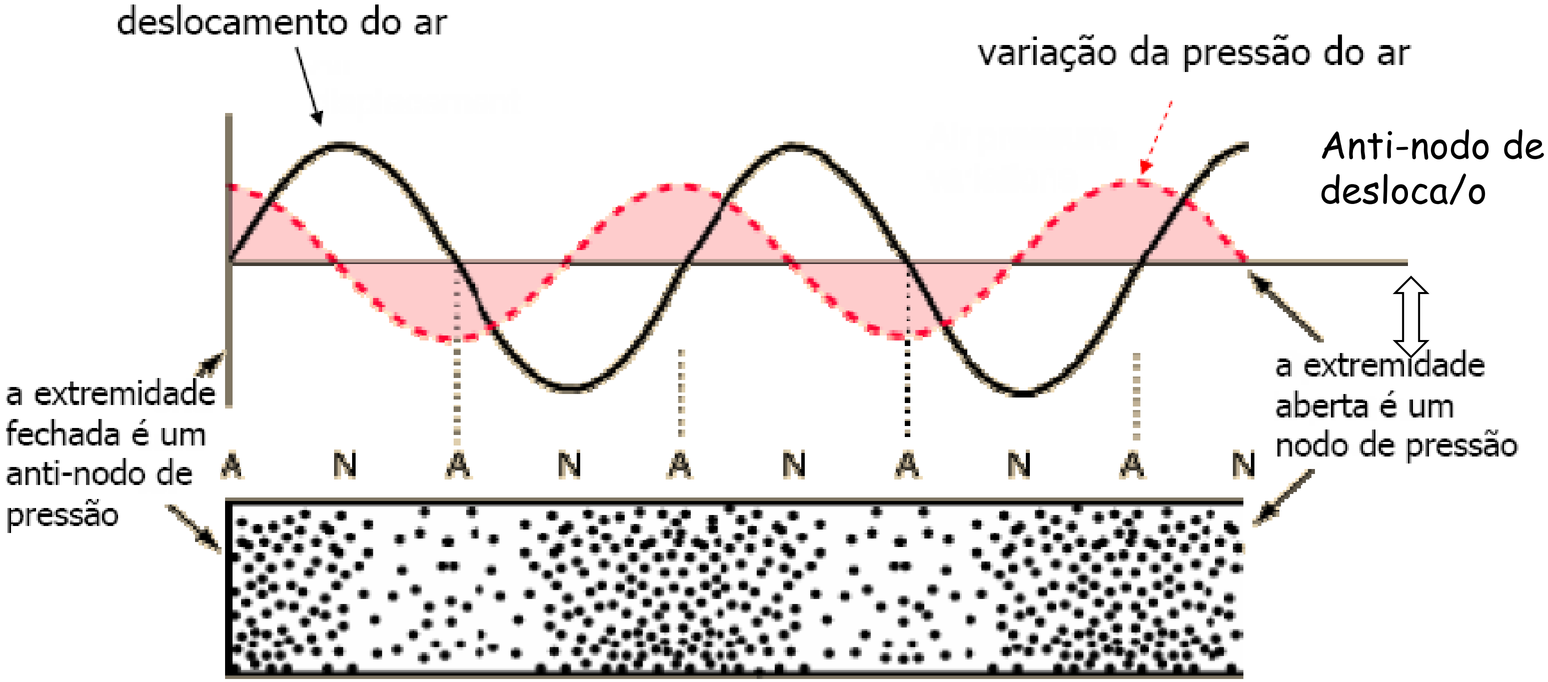
Demais frequências: SOBRETONS / HARMÔNICAS

Ondas Estacionárias (Cordas)

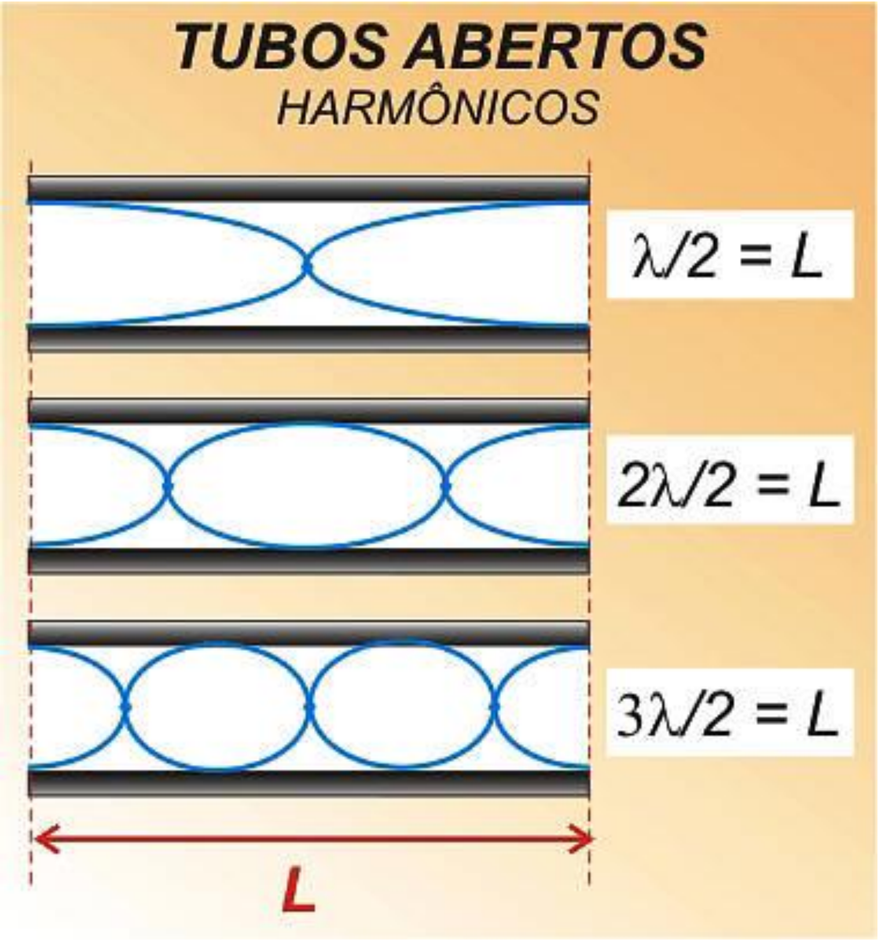


ONDAS EM UM TUBO COM EXTREMIDADE ABERTA

Quando uma onda longitudinal se propaga em um tubo, as ondas são refletidas do mesmo modo que as ondas transversais são refletidas em uma corda. Uma ONDA ESTACIONÁRIA também pode ser produzida e transmitida para o ar circundante.



TUBOS ABERTOS



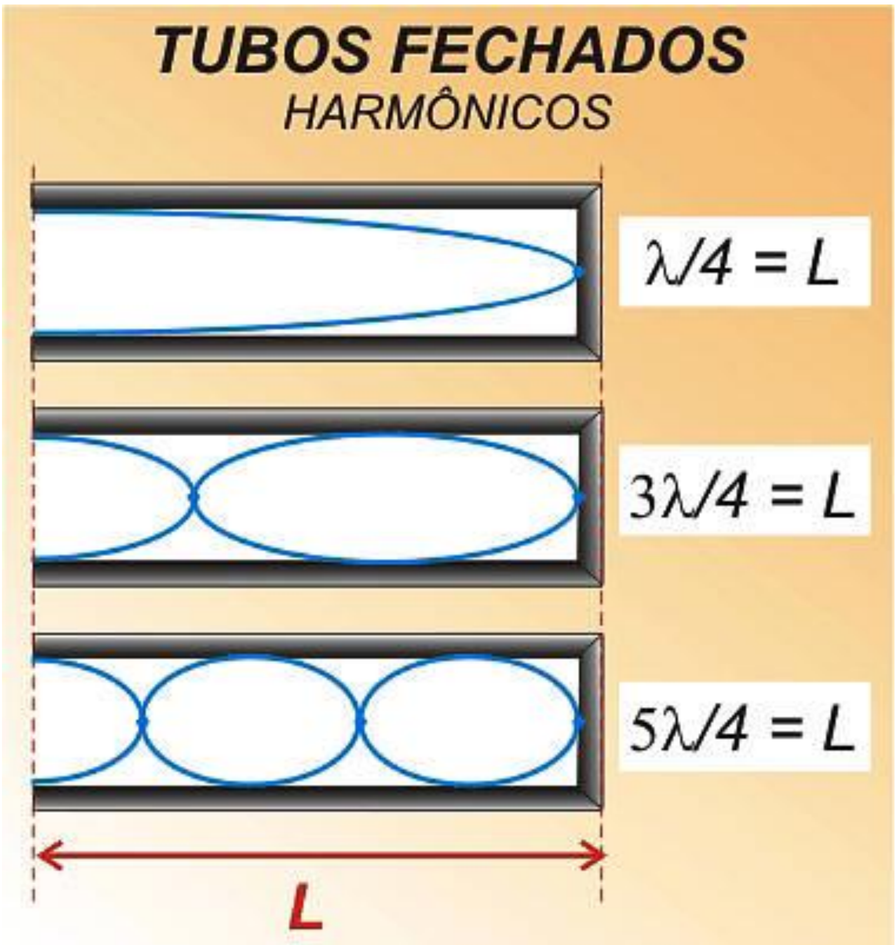
$$n\frac{\lambda_n}{2} = L \Rightarrow \lambda_n = \frac{2L}{n}$$

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{v}{\frac{2L}{n}} \Rightarrow f_n = n\frac{v}{2L}$$

$$n = 1,2,3,\ldots$$

$$f_n = n\frac{v}{2L}$$

TUBOS FECHADOS



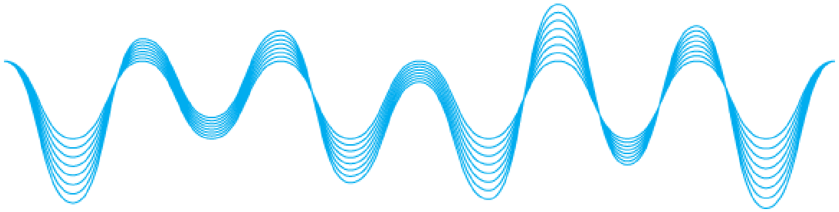
$$i\,\frac{\lambda_i}{4} = L \Rightarrow \lambda_i = \frac{4L}{i}$$

$$f_i = \frac{v}{\lambda_i} = \frac{v}{\frac{4L}{n}} \Rightarrow f_i = i\,\frac{v}{4L}$$

$$i = 1,3,5,7\ldots$$

$$f_i = i\,\frac{v}{4L}$$

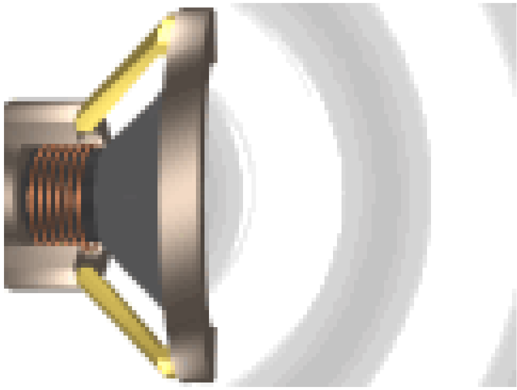
O que podemos aprender com o estudo das ondas sonoras?

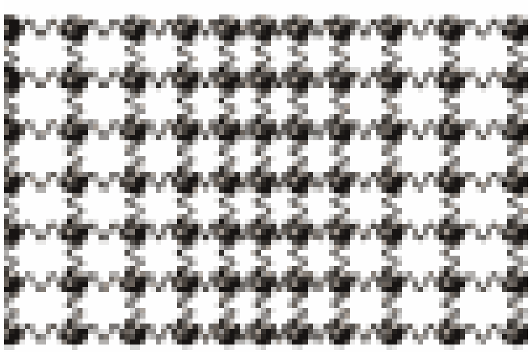


Como a fala é produzida?
Como corrigir os defeitos de dicção?
Como reduzir a perda de audição?
Por que uma pessoa ronca?

Como melhorar a acústica de um ambiente?
Como reduzir o nível de ruído?
Como reproduzir sons com a máxima fidelidade?
E as ondas de choque produzidas pelos jatos supersônicos?
Descobrir a localização de uma pessoa através do som por ela produzido?

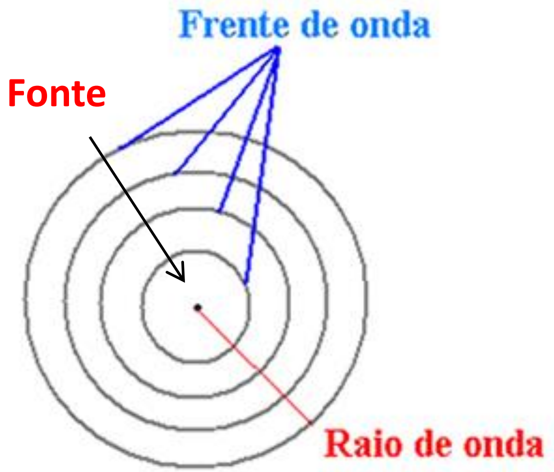
Ondas Sonoras

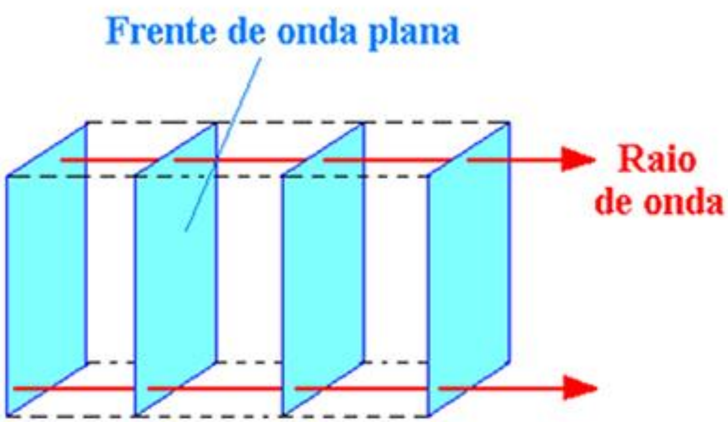




Onda Longitudinal – O deslocamento das moléculas de ar é paralelo à direção de propagação da onda.

Ondas Sonoras



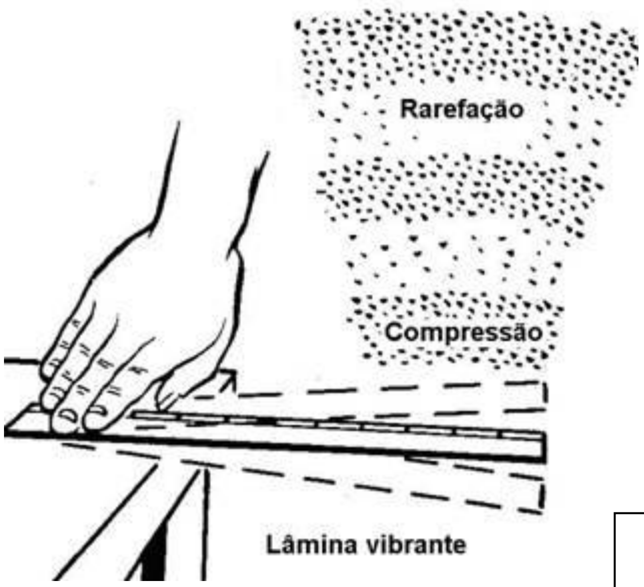


Frentes de onda são superfícies nas quais as oscilações produzidas pelas ondas sonoras tem o mesmo valor.

Raios são retas perpendiculares às frentes de onda que indicam sua direção de propagação

Nas proximidades da fonte as frentes de onda são **esféricas**. Para distâncias maiores, elas são aproximadamente **planas**.

Natureza do Som



Deslocamento de fluido muda a densidade

Mudança de densidade gera mudança de pressão

Variação de pressão produz deslocamento

A Velocidade do Som

Substância	Temperatura (ºC)	Velocidade do som (m / s)
Gases		
Ar	0	331
Ar	20	343
Ar	100	387
Dióxido de Carbono	0	259
Oxigênio	0	316
Helio	0	965
Líquidos		
Clorofórmio	20	1 004
Etanol	20	1 162
Mercúrio	20	1 450
Água Fresca	20	1 482
Sólidos		
Cobre	-	5 010
Vidro Pirex	-	5 640
Aço	-	5 960
Berílio	-	12 870

Ondas Sonoras Harmônicas

Onda sonora harmônica progressiva

$$u(x,t) = U\cos(kx - \omega t + \delta)$$

Onda de pressão correspondente à onda de deslocamento

$$p(x,t) = -\rho_0 v^2 \frac{\partial u}{\partial t}(x,t)$$

$$p(x,t) = P sen(kx - \omega t + \delta)$$

onde $\quad P = \rho_0 v^2 kU$

Ondas Sonoras Harmônicas

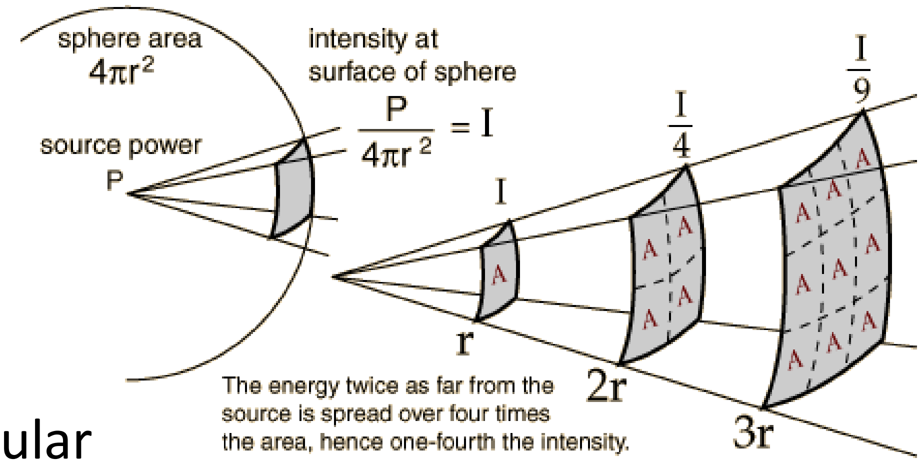
$$Intensidade = I = \frac{1}{A}\left\langle F\frac{\partial u}{\partial t}\right\rangle = \frac{1}{2}\omega P U$$

$$\boxed{Intensidade = I = \frac{1}{2}\rho_0 v\omega^2 U^2}$$

Ou

$$\boxed{Intensidade = I = \frac{1}{2}\frac{P^2}{\rho_0 v}}$$

Intensidade em 3-D



Intensidade I de uma onda:

- Potência transportada por unidade de área perpendicular ao fluxo de energia.

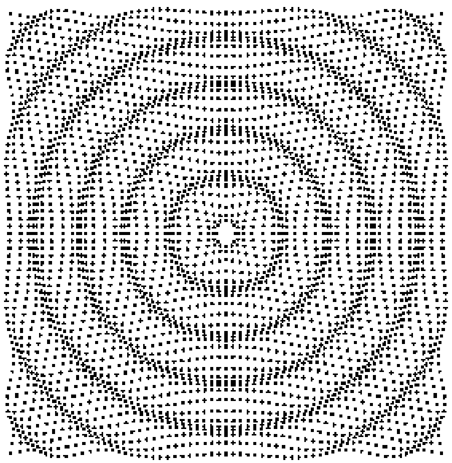
$$I = \frac{\text{Potencia}}{\text{area}} = \frac{\text{energia/tempo}}{\text{area}}$$

Mas, como a energia é proporcional à amplitude ao quadrado:

$$\boxed{I \propto A^2}$$

Intensidade em 3-D

No caso de ondas esféricas (a energia flui para todas as direções):



$$I = \frac{P}{4\,\pi\,r^2}$$

$$I = \frac{1}{2}\rho_0\, v\,\omega^2 U^2$$

U: amplitude de deslocamento da onda sonora,

Por exemplo, quando a distância é duplicada, a intensidade é reduzida de ¼ do seu valor anterior! (e a amplitude também vai diminuir com a distância).

Ondas Sonoras Harmônicas

Limiar da audibilidade

$$f = 10^3 s^{-1} \longrightarrow I_0 = 10^{-12} W/m^2$$

Para $\rho_0 \approx 1{,}3 kg/m^3$, $v \approx 340 m/s$ $\longrightarrow$ $P \approx 3\times10^{-5} N/m^2$

A amplitude de deslocamento associada é $U_0 \approx 1{,}1\times10^{-11} m$

Limiar da dor $\longrightarrow$ $I_m \approx 1 W/m^2$

$$U_m \approx 1{,}1\times10^{-5} m$$

Ondas Sonoras Harmônicas

Nível de Intensidade Sonora (Weber e Fechner)

$$\alpha = 10\log\left(\frac{I}{I_0}\right) db (= decibel)$$

Exemplos:

Limiar da audibilidade	0 dB
Murmúrio	20 dB
Música suave	40 dB
Conversa comum	65 dB
Rua barulhenta	90 dB
Avião próximo	100 dB
Limiar da dor	120 dB

Níveis de Intensidade e Pressão

Nível de Pressão Sonora - Sound pressure level, dB

$$SPL = 10 \log [(P/P_{ref})^2] = 20 \log (P/P_{ref})$$

onde $P_{ref} = 2x10^{-5}$ N/m^2

Nível de Intensidade Sonora - Sound intensity level, dB

$$SIL = 10 \log (I/I_{ref})$$

onde $I_{ref} = 10^{-12}$ Watt/m^2

Nível de Potência Sonora – Sound power level, dB

$$SWL = 10 \log (W/W_{ref})$$

onde $W_{ref} = 10^{-12}$ Watts

Combinando níveis de Ruído

- Qual é o efeito de adicionar um novo equipamento em um local ruidoso?
- Você quer ajustar uma medida de ruído devido a um ruído do ambiente?
- Você está interessado em predizer o resultado de uma combinação de fontes de ruído?

Você não pode obter as respostas simplesmente adicionando decibels:

Você deve somar Intensidades!

Combinando níveis de Ruído

1. Converta os decibels em razões de intensidade ou potência
2. Some ou subtraia as intensidades relativas
3. Converta para decibels

Tabela Prática

Diferença entre sons (dB)	Somar ao maior
0 a 1	3
> 1 a 4	2
> 4 a 9	1
Mais que 9	0

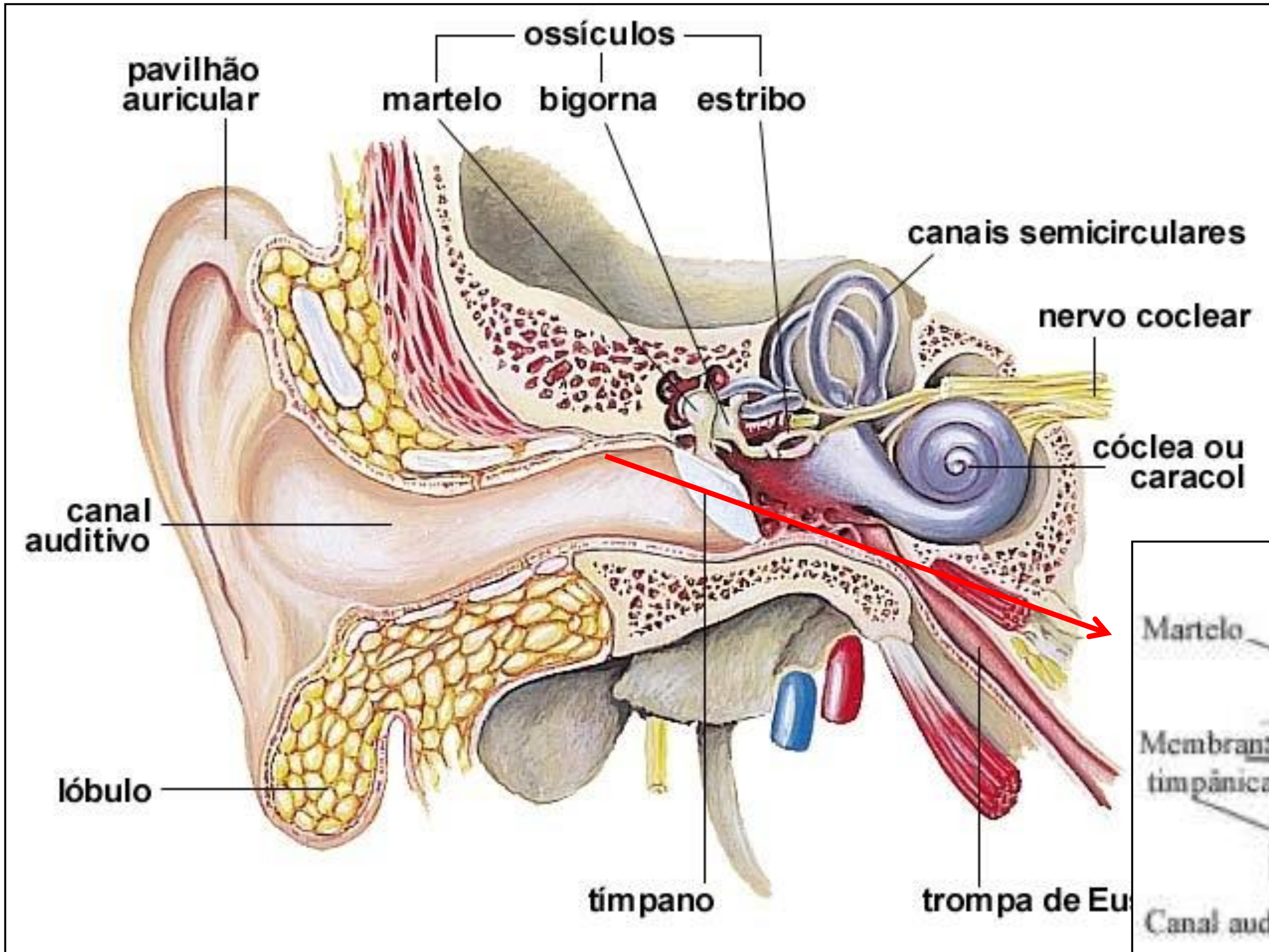
A função audição

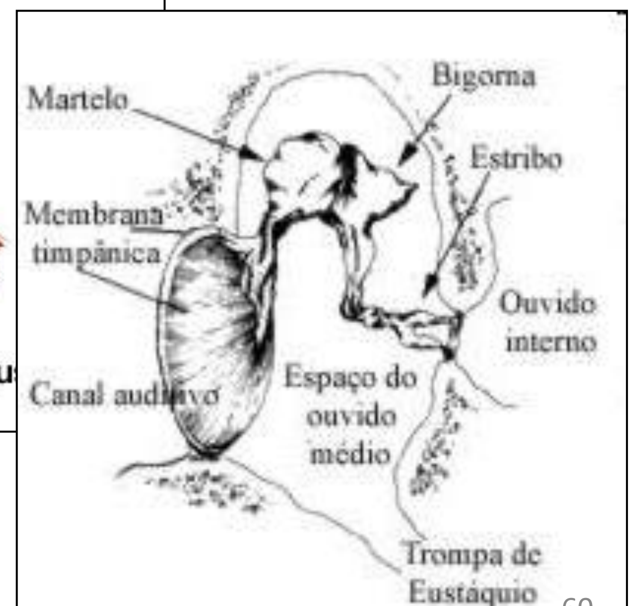
Alguns números:

- Nosso ouvido responde a variações de pressão dentro de um intervalo de 1 milhão de vezes...
- As vibrações no tímpano podem ser tão pequenas quanto 10^{-8} mm...
- Ouvimos de 20 a 20.000 Hz
- Somos pouco sensíveis a baixas frequências (nossa sensibilidade a 1000 Hz é cerca de 1000 vezes maior que a 100 Hz...
- Nossa sensibilidade para sons de altas frequências decresce gradualmente por toda a vida...
- Um adulto tem dificuldades em ouvir sons com frequências superiores a 10.000 ou 12.000 Hz...
- Seletividade

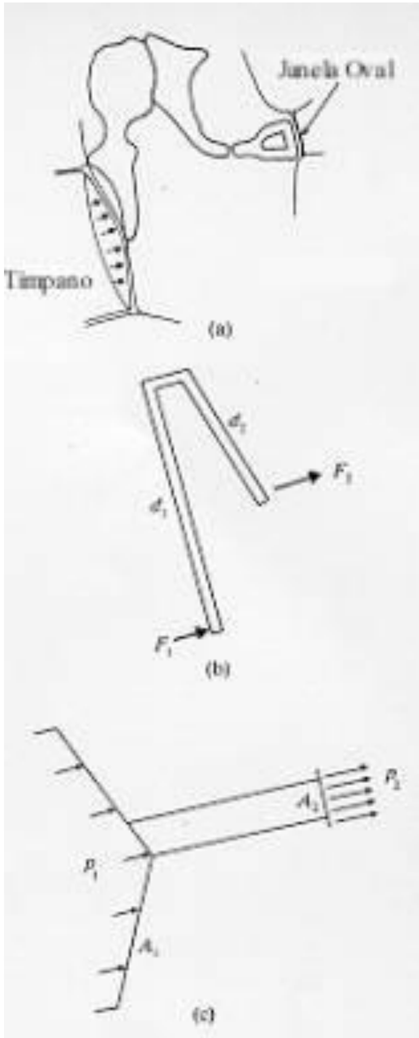
F106 – Fundamentos de Física para Biologia

Estrutura do Ouvido





Estrutura do Ouvido



Processo de Amplificação das ondas sonoras pelos ossículos (ouvido médio):

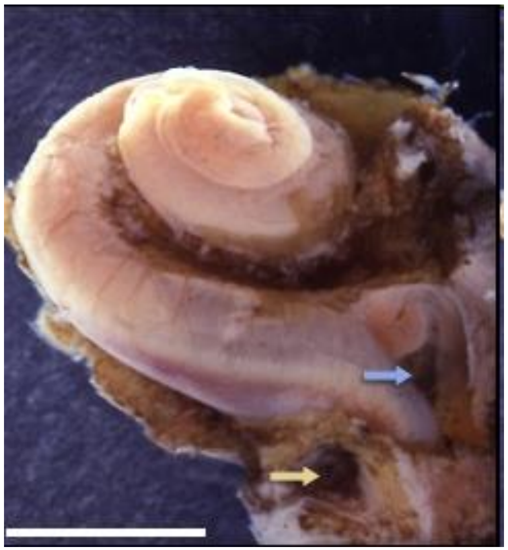
(a) – Os três ossos ligam o tímpano ao ouvido interno (janela oval).

(b) – Efeito alavanca: uma pequena força atuando numa grande distância resulta numa força acentuada que atua numa distância pequena.

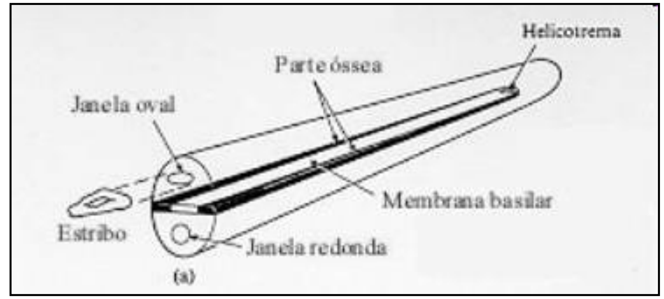
(c) – Efeito pistão: uma pressão baixa que está distribuída numa área grande resulta numa pressão alta numa área pequena.

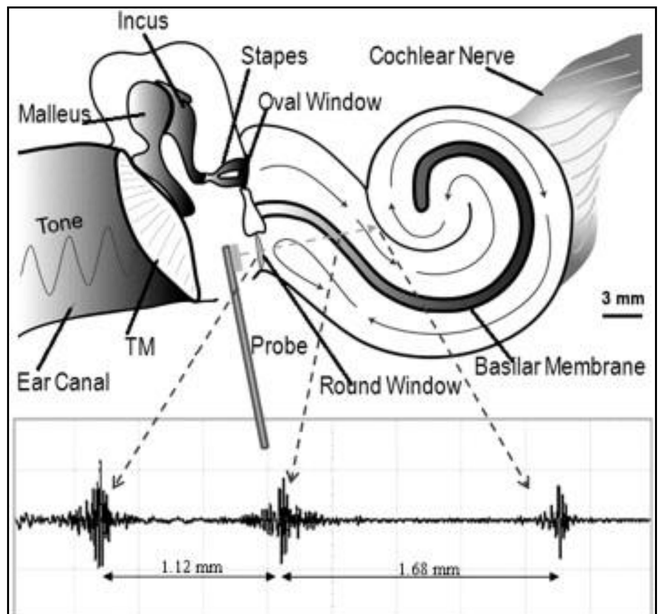
Estrutura do Ouvido – A Cóclea

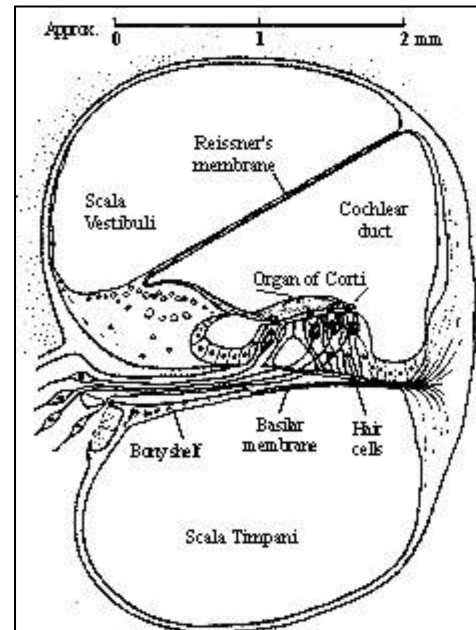
Cóclea de um feto humano
(5 meses de gestação)



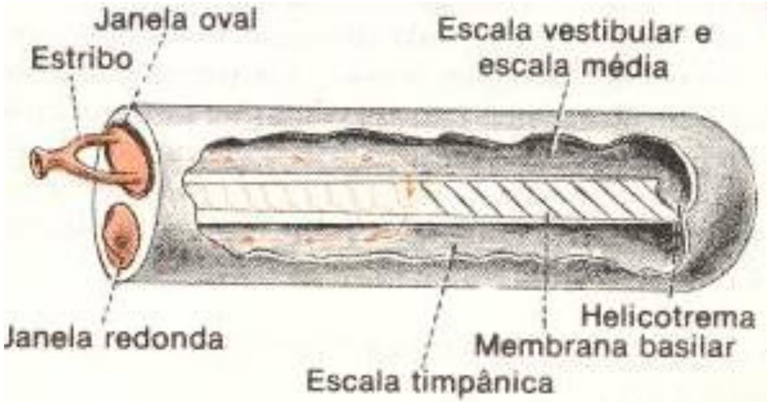
Cóclea - Diagrama esquemático

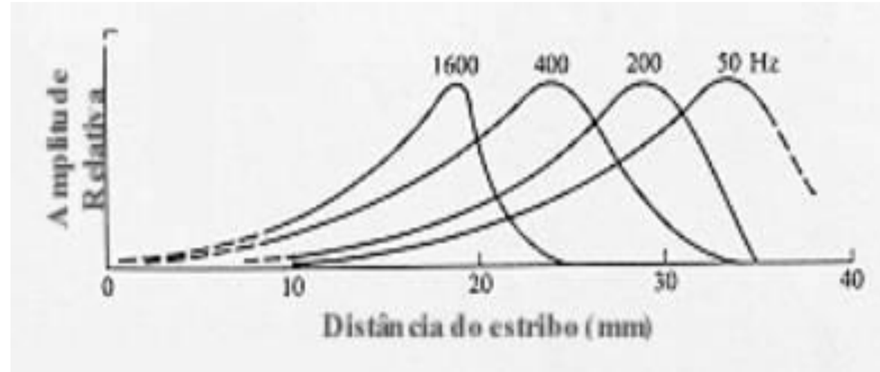






Estrutura do Ouvido – Membrana Basilar





A membrana basilar é uma estrutura ressonante, ou seja, determinadas zonas da membrana basilar têm uma resposta mais acentuada em uma pequena gama de freqüências, fazendo com que ela se desloque mais.

Perto da janela oval os sons agudos sofrem o efeito de ressonância e apresentam uma maior amplitude, isto aonde a membrana basilar se apresenta mais estreita e rígida.

Por outro lado os sons graves apresentam picos de pressão mais acentuados perto da janela redonda, no final do canal timpânico, onde a membrana basilar é mais larga e frouxa.

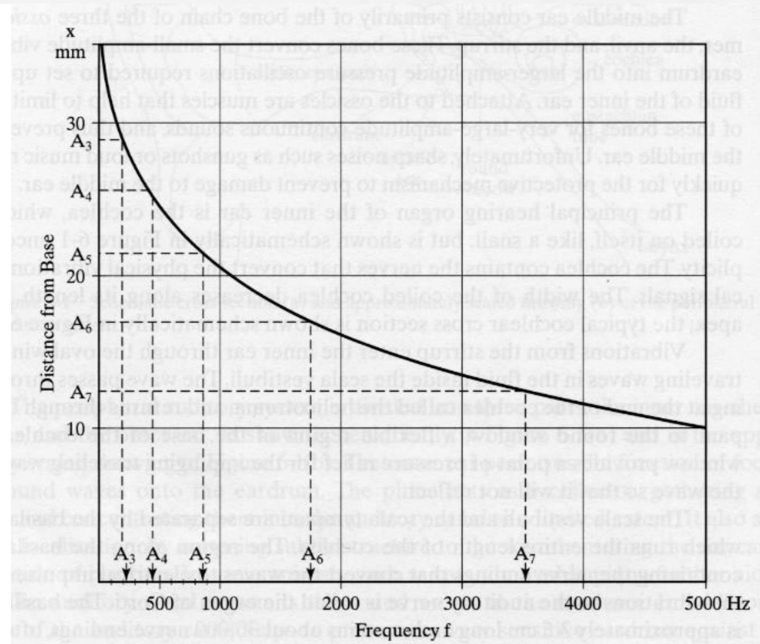


Figure 6-3 Position of the resonance maximum on the basilar membrane for a pure tone of frequency f (after von *Békésey*, 1960). (From *The Physics and Psychophysics of Sound* by Juan G. Roederer, Figure 2.8, page 25, © 1995 by Springer-Verlag, New York. Used with permission.)

Atributos Subjetivos do Som

	Qualidade Subjetiva			
Parâmetro Físico	**Loudness**	**Pitch**	**Timbre**	**Duração**
Pressão	+ + +	+	+	+
Frequência	+	+ + +	+ +	+
Espectro	+	+	+ + +	+
Duração	+	+	+	+ + +
Envelope	+	+	+ +	+

Sound Pressure Level

Nível de Pressão Sonora - Sound pressure level, dB

$$L_P = SPL = 10 \log [(P/P_{ref})^2] = 20 \log (P/P_{ref})$$

onde $P_{ref} = 2x10^{-5}\ N/m^2$

Limiar da Audibilidade

O Limiar da Dor corresponde a uma pressão 10^6 vezes maior...

Mas ainda 1000 vezes menor do que a pressão atmosférica

É o que medimos, as outras grandezas são encontradas a partir desta...

Sound Intensity Level / Sound Power Level

Nível de Potência Sonora – Sound power level, dB

$$L_W = SWL = 10 \log (W/W_{ref})$$

onde $W_{ref} = 10^{-12}$ Watts

Identifica a potência sonora total emitida por uma fonte em todas as direções

Nível de Intensidade Sonora - Sound intensity level, dB

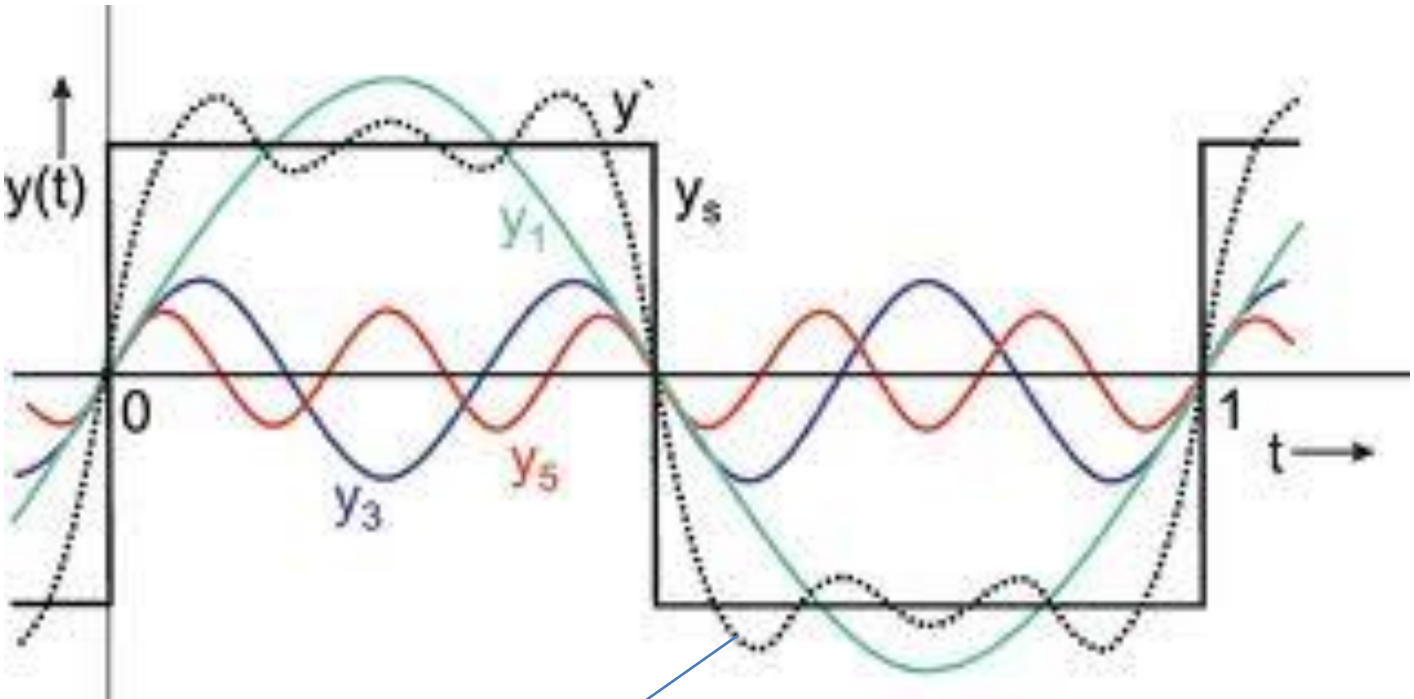
$$L_I = SIL = 10 \log (I/I_{ref})$$

onde $I_{ref} = 10^{-12}$ Watt/m^2

Identifica a potência sonora por unidade de área

Espectro Sonoro

Um tom complexo é o resultado de uma vibração complexa, é a somatória de vibrações simples



É o resultado da soma: $y_1 + y_3 + y_5$

Loudness

O que é? Sensação Auditiva?

O ouvido humano não é igualmente sensível para todas as freqüências! Por quê?

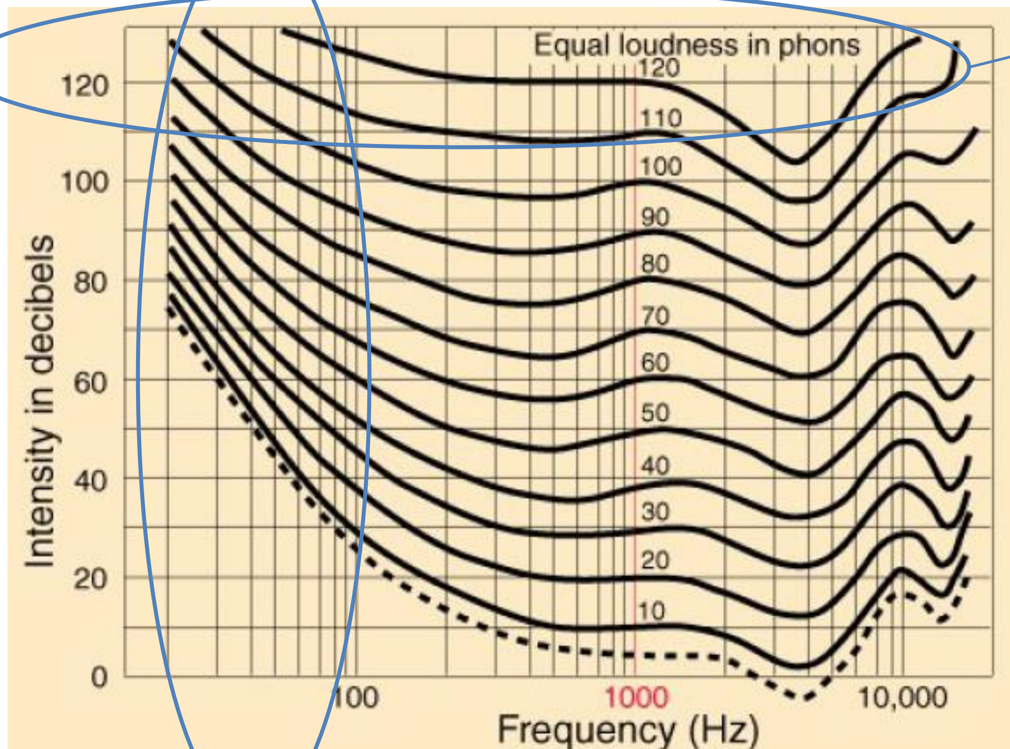
Quais são as relações existentes entre as alterações nas propriedades físicas das vibrações sonoras (intensidade, freqüência) e as correspondentes alterações subjetivas na sensação auditiva (loudness)?

Curvas Isoaudíveis ou Isofônicas

Loudness X frequência

- Curvas Isoaudíveis ou Isofônicas de Fletcher e Munson (1933)
- Determinaram em quais intensidades, tons de diferentes frequências seriam percebidos com o mesmo *loudness* de um tom de 1000Hz tomado com referência
  - Essas curvas representam o resultado de um grande número de experiências psicoacústicas feitas em diferentes condições
  - As curvas finais obtidas representam o resultado da média estatística das pesquisas feitas sobre um grande número de pessoas jovens, entre 18 e 25 anos, em condições normais (grupo de indivíduos otologicamente normais)

Curvas Isoaudíveis ou Isofônicas

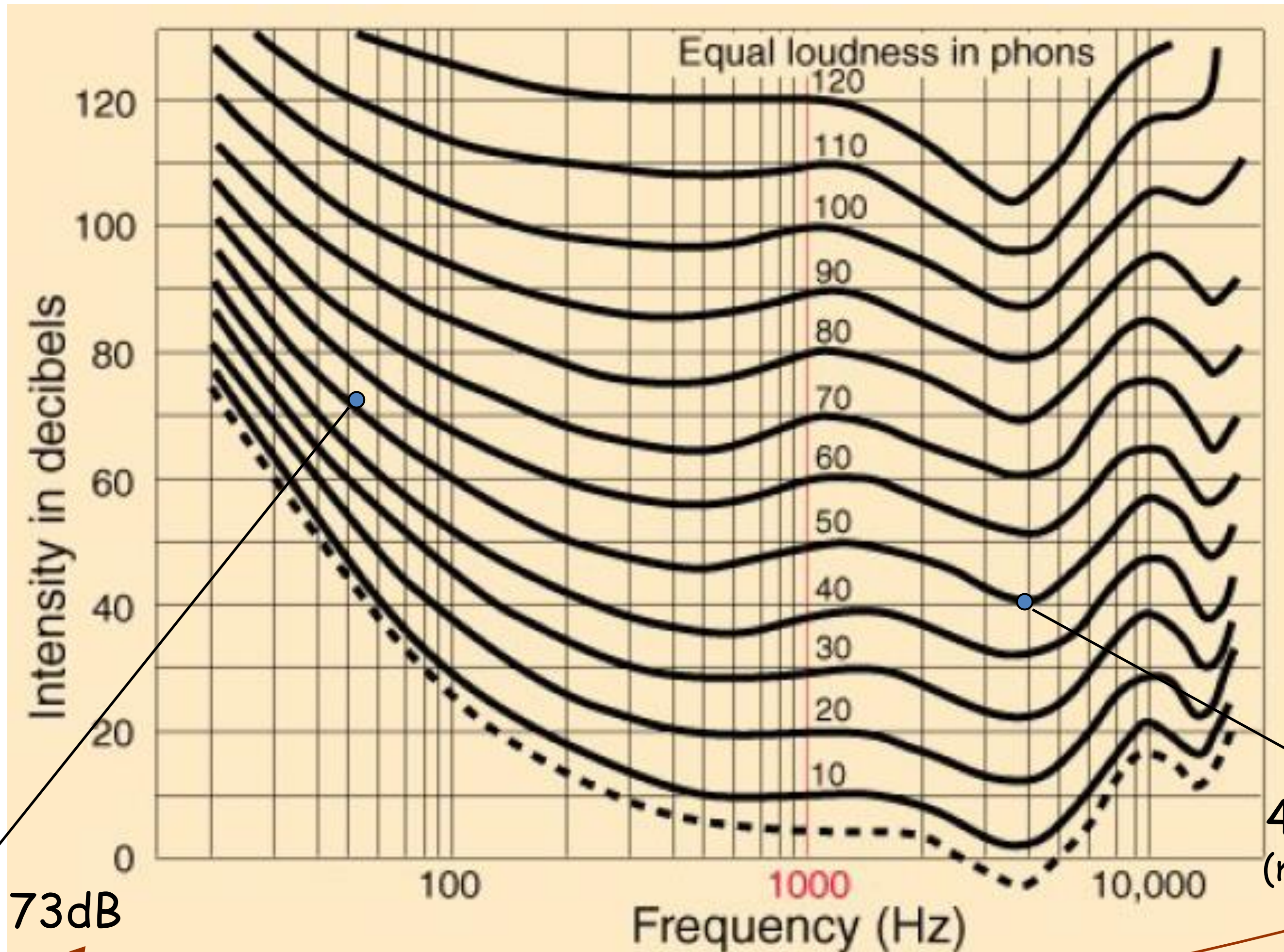


Curvas tendem a se achatarem à medida que a intensidade aumenta

Mostram o contorno dos níveis de *loudness* ou contornos isoaudíveis, e expressam como a sensação subjetiva de como intensidade de um tom puro de determinado nível de pressão sonora varia com a frequência

Sensibilidade diminui com as baixas freqüências

Curvas Isoaudíveis ou Isofônicas



50Hz a 73dB

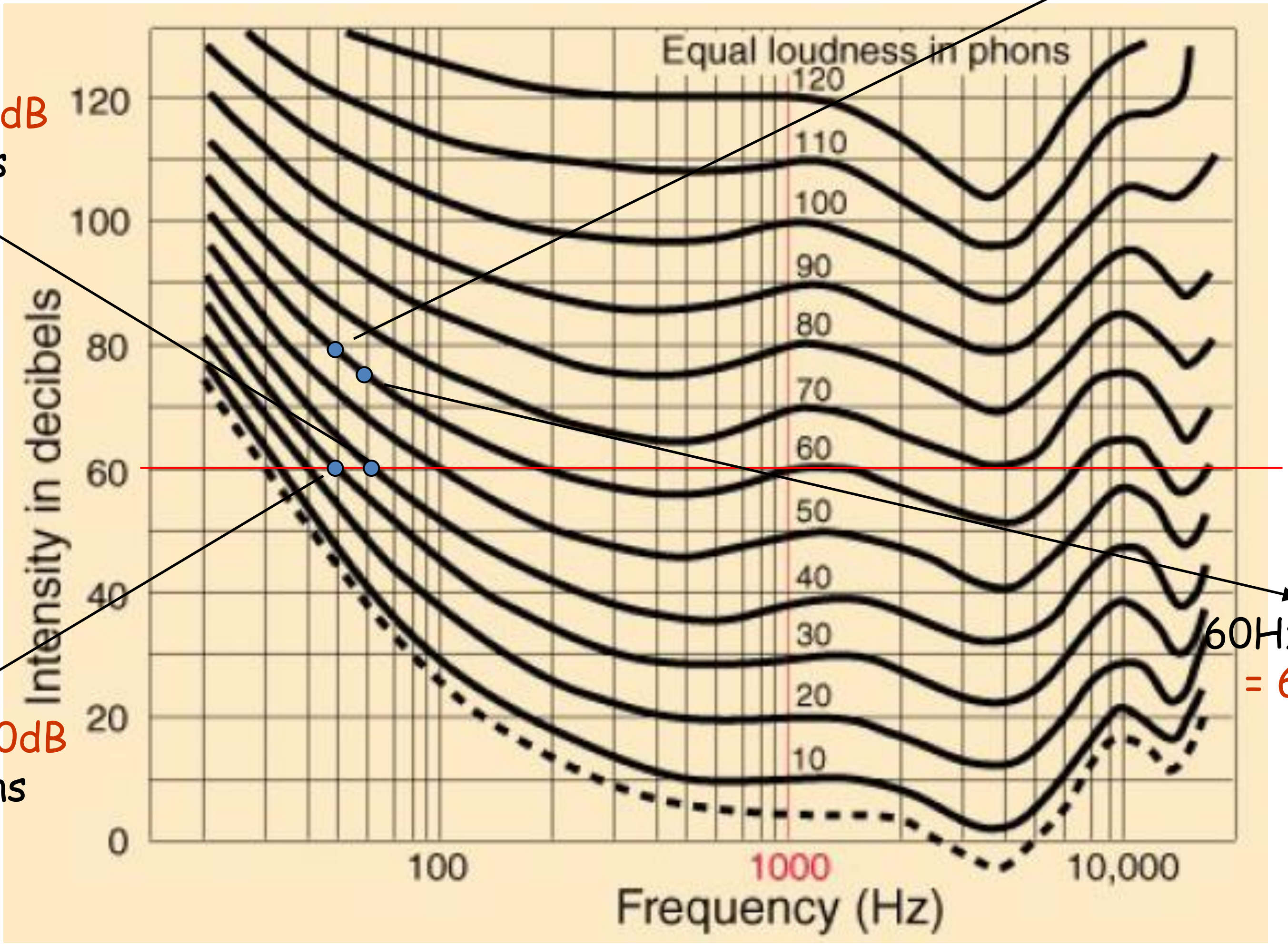
4000Hz a 40dB
(maior sensibilidade)

Mesmo Loudness!!!
= 50 fons

Curvas Isoaudíveis ou Isofônicas

50Hz a 80dB
= 60fons

60Hz a 60dB
= 40fons



60Hz a 75dB
= 60fons

50Hz a 60dB
= 30fons

Pitch

Característica de um som que o determina como alto ou baixo em uma determinada escala.

É determinado, principalmente, pela **frequência**. Embora, possa se alterar com o nível sonoro.

Também depende do espectro (timbre) e da duração.

ANSI (1960) → "...atributo da sensação auditiva, no qual um som pode ser ordenado em uma escala..." → Escala Musical (?)

Pitch é uma sensação <u>**subjetiva**</u>.

Pitch Absoluto

Capacidade de reconhecer e definir o pitch de um tom sem o uso de um tom de referência → Ouvido Absoluto.

0,01% da população

Estudos tem sido feitos nos últimos 90 anos:

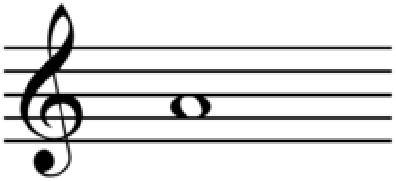
Teoria da Hereditariedade – a capacidade é uma herança.

Teoria da Aprendizagem – pode ser adquirida pelo treino.

Teoria da Desaprendizagem – perdemos esta capacidade, que existe na infância.

Imprinting Theory – Rápido e irreversível aprendizagem que tem lugar em uma fase específica do desenvolvimento

Padrões de Pitch



Lá 440 – A440 - *ISO 16:1975 Acoustics -- Standard tuning frequency (Standard musical pitch)*

Timbre ou Qualidade do Tom

→ "A Cor do Tom"

ANSI (1960) – "...É o atributo da sensação auditiva em termos do qual um ouvinte pode avaliar dois sons similares, em loudness e pitch, como diferentes..."

Depende: do espectro do estímulo, da forma de onda, da pressão sonora, das características temporais do estímulo e da localização em frequência do espectro.

Uma onda complexa...

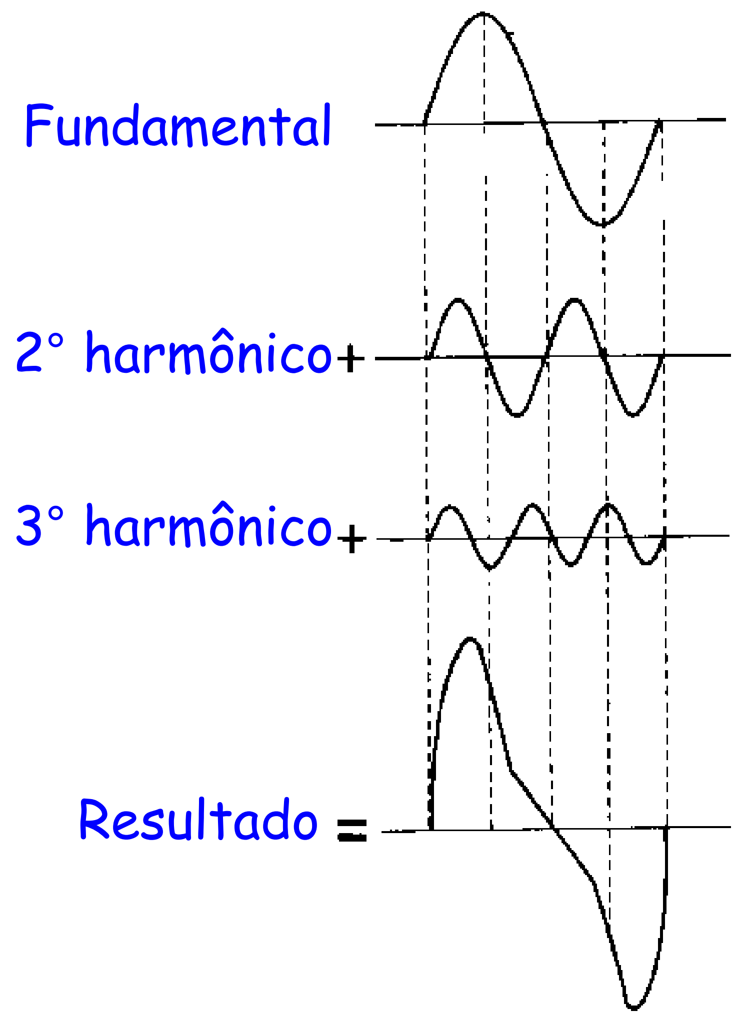
O conteúdo harmônico:

- é um dos responsáveis pelo **timbre** de um instrumento
- é chamado **Resposta em Frequência** ou **Espectro**

Síntese aditiva:

- Toda onda pode, teoricamente, ser obtida a partir de senoides

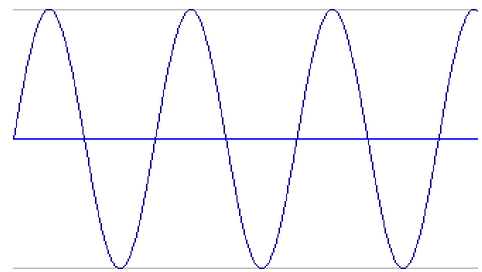
EXEMPLO:



Conteúdo Harmônico

Simples (senoidal): **Não existe na natureza!**

$$x(t) = Asen(\omega t + \theta)$$



A = amplitude

ω = frequência angular

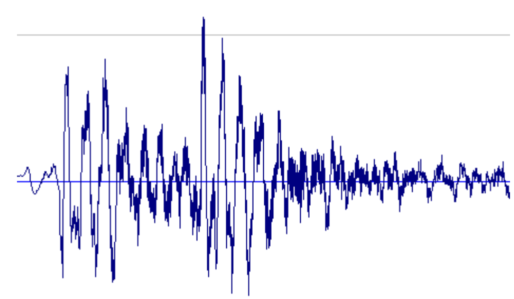
θ = fase inicial

Complexa (composta de senoidais): **Série de Fourier**

$$f(t) = a_k + a_0 sen\omega_0 t_0 + a_1 sen\omega_1 t_1 + ... + a_n sen\omega_n t_n$$

$f_0 = \omega_0/2\pi$ é chamada de **frequência fundamental**

as outras são chamadas de **parciais ou harmônicos** = parcial múltiplo de f_0



1° sobretom = 2° harmônico ou parcial

2° sobretom = 3° harmônico ou parcial

E assim sucessivamente...

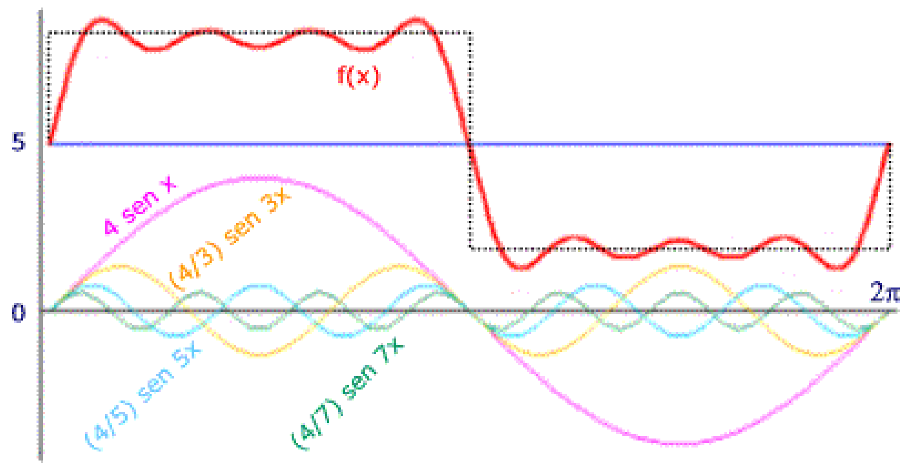
Análise de Fourier

Jean Baptiste Joseph Fourier (1768-1830)

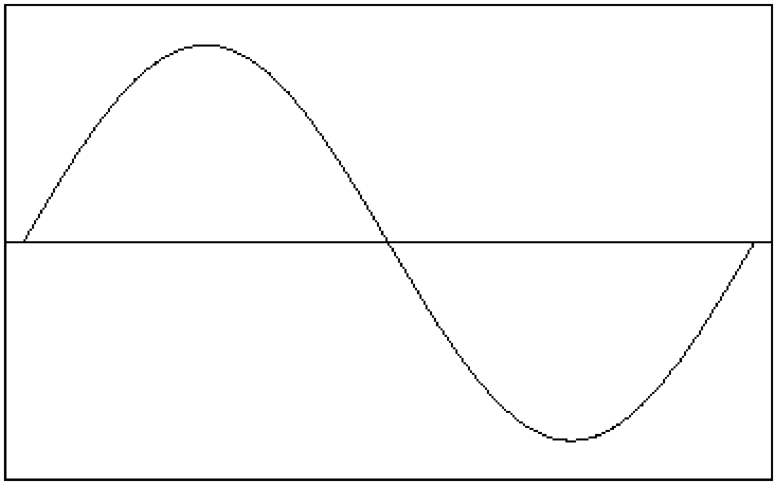
Fourier mostrou que:

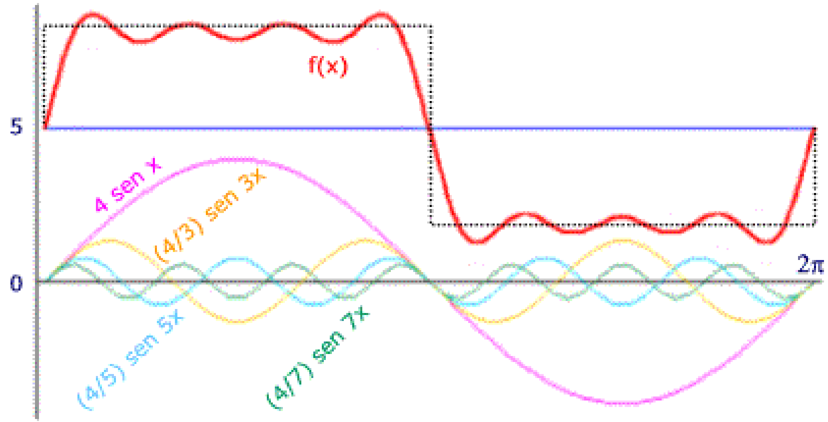
(a) Que é possível reduzir uma onda complexa, por mais complicada que seja, em uma soma de ondas senoidais (superposição de vibrações harmônicas puras)

(b) As únicas ondas senoidais necessárias são ondas com frequências que são múltiplos inteiros da freqüência fundamental (Mas nem todas frequências precisam estar presentes!)

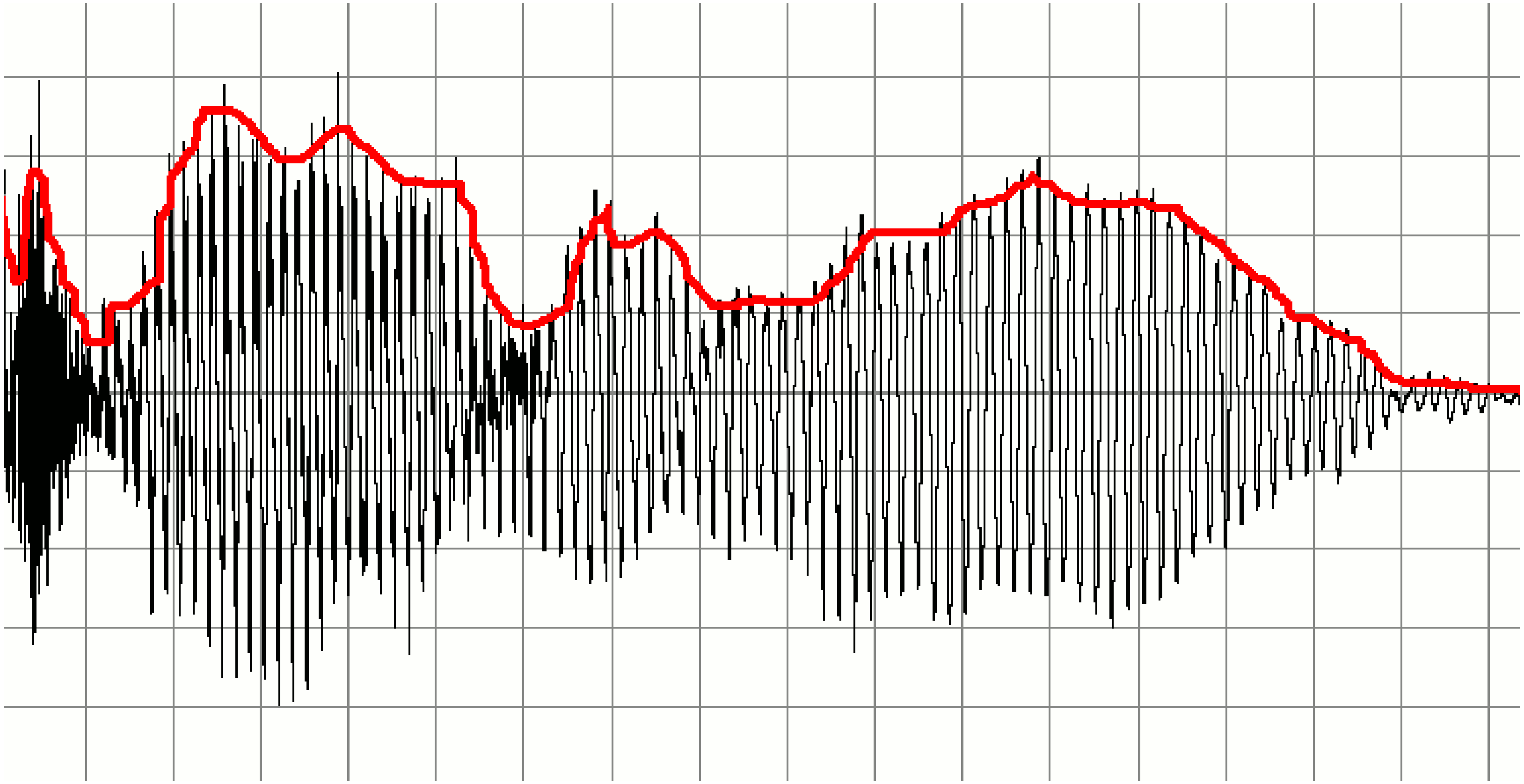


Análise de Fourier



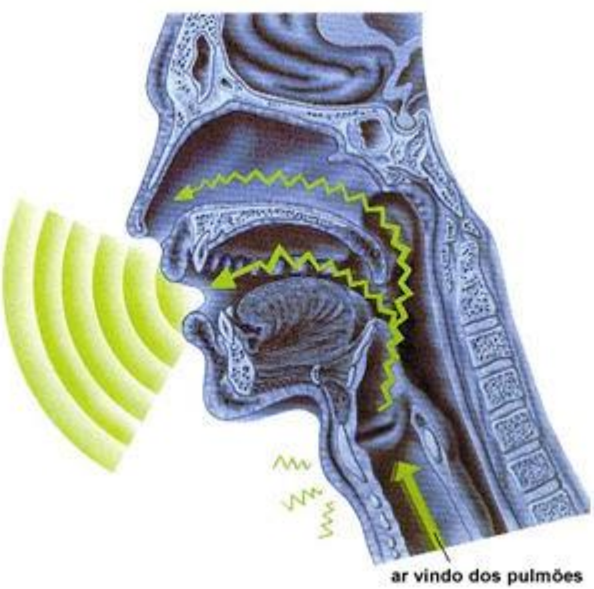


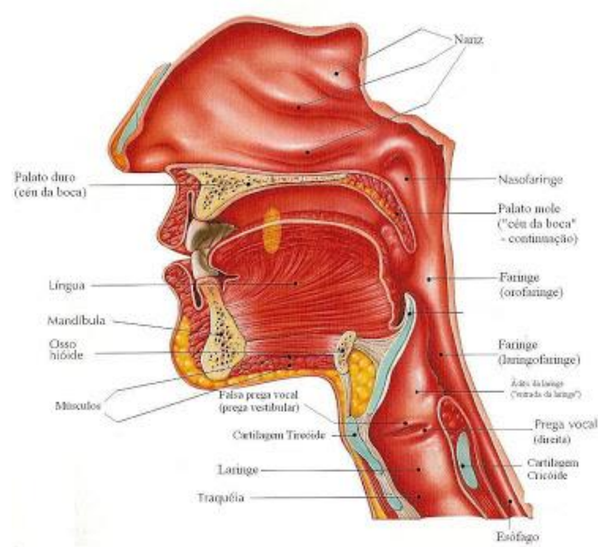
Envelope e Duração



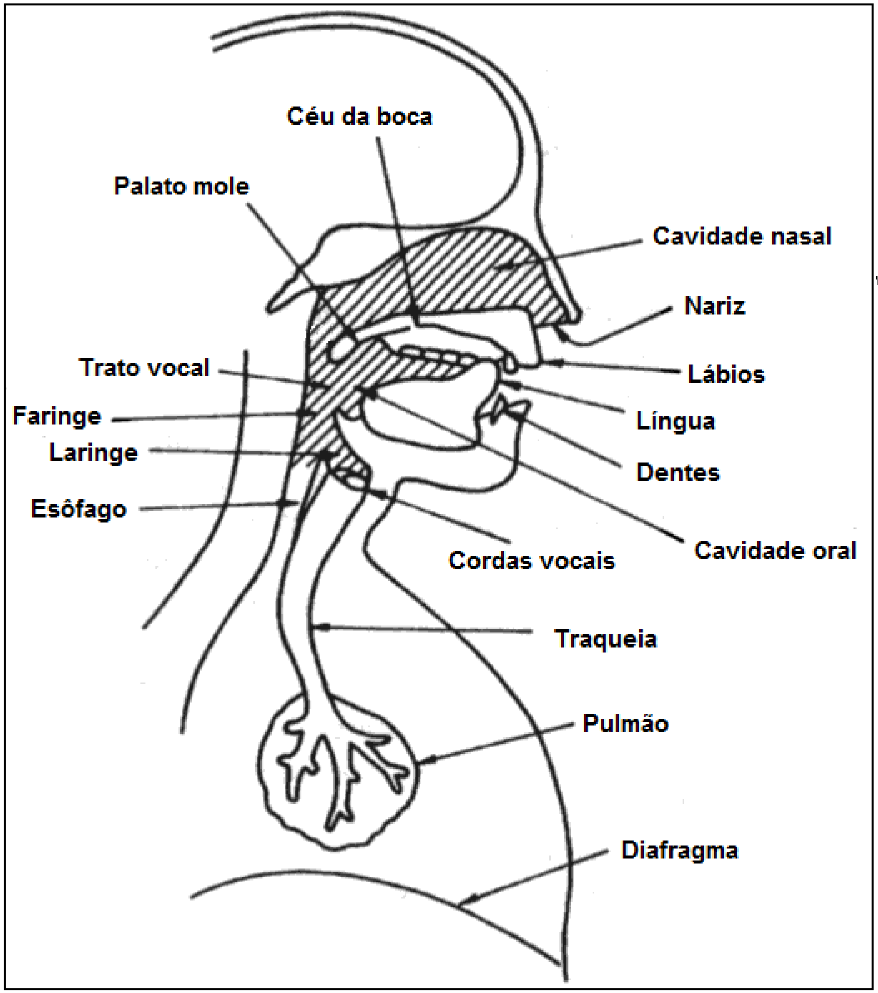
A Produção da Fala

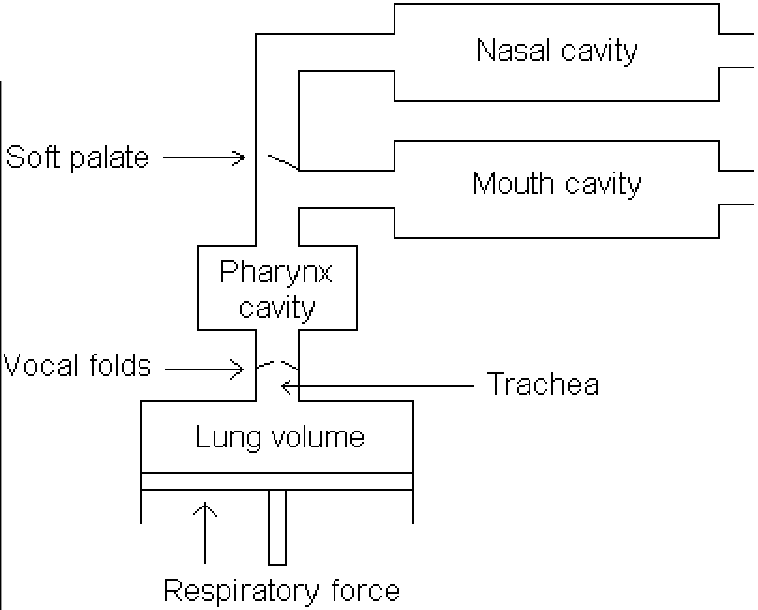
O ouvido tem sua sensibilidade máxima no intervalo de freqüências de 1000 a 4000Hz. É neste intervalo que as ressonâncias (chamadas formantes) do trato vocal ocorrem.





Os Órgãos Vocais





Para produzirmos os sons da fala, o fluxo de ar precisa ser interrompido pelas cordas (pregas) vocais ou através de constrições no trato vocal (feitas usando-se a língua ou os lábios, por exemplo).

Os Órgãos Vocais – Como? Um Modelo...

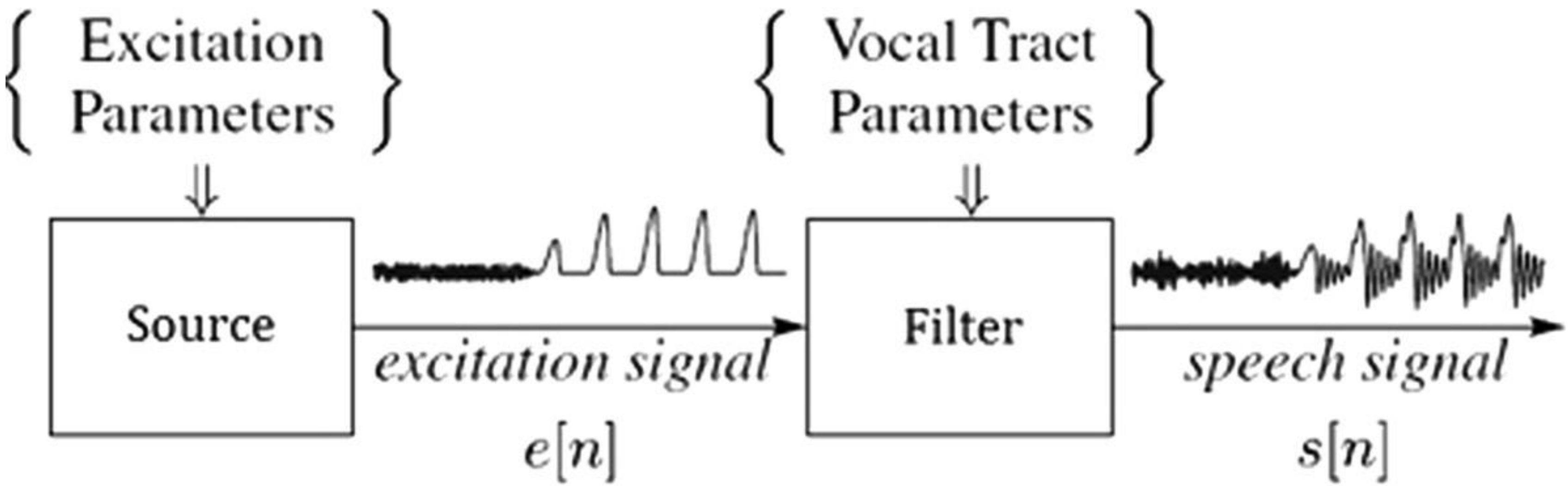
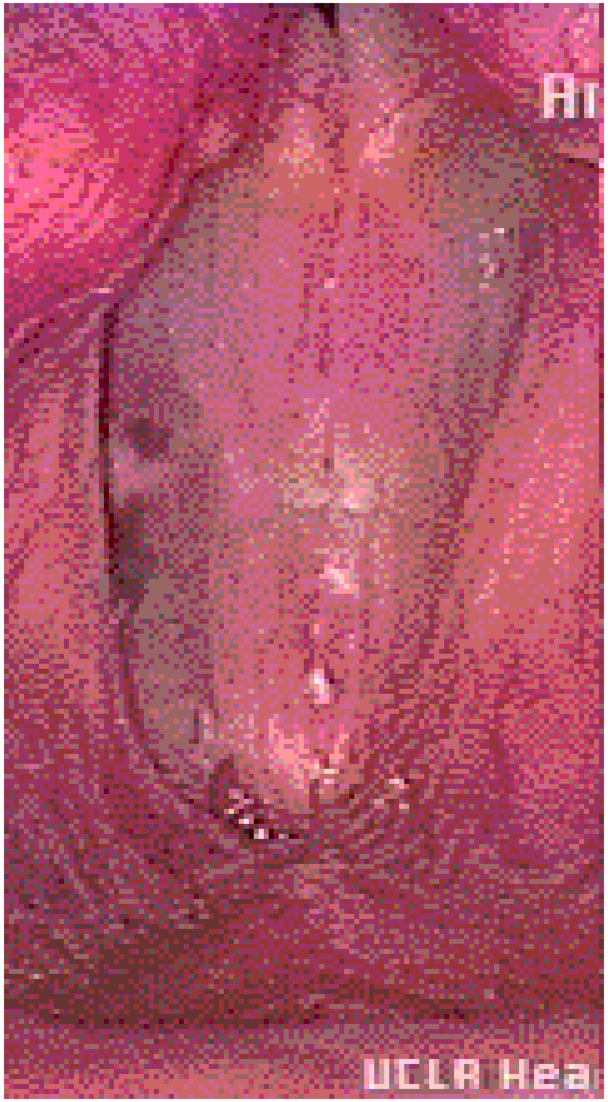


Figure 2: Source-Filter Model of Speech Production

A Laringe e as Cordas ou Pregas Vocais



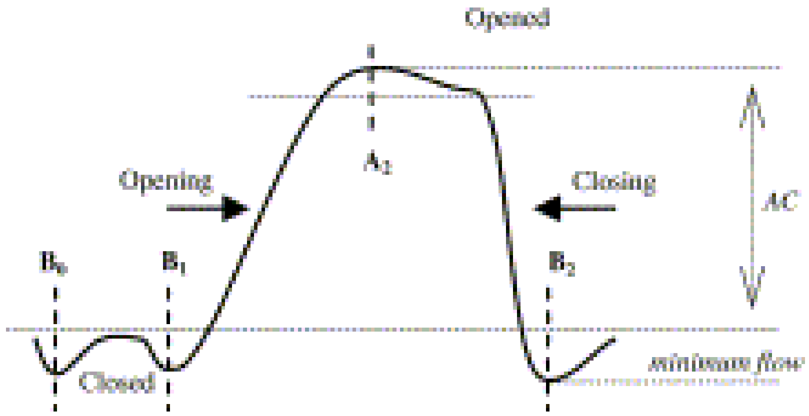
As cordas vocais modulam o fluxo de ar, abrindo e fechando rapidamente a passagem pela laringe.

Sua taxa de vibração é determinada principalmente por sua massa e tensão, embora a pressão e velocidade do ar também contribuam, em menor escala.

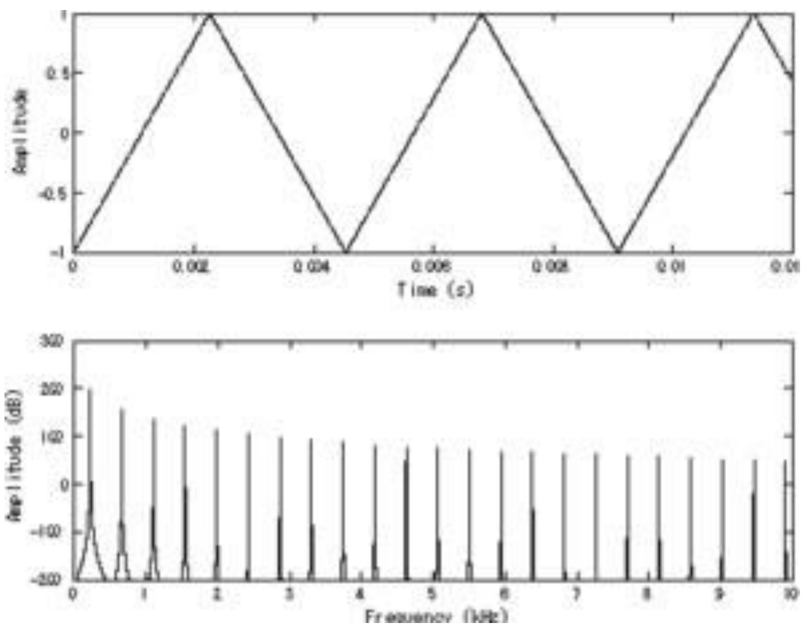
Durante uma fala normal, a taxa de vibração das pregas vocais pode variar a uma razão de 2:1 (uma oitava).

Frequências típicas
Homem: 110 Hz; Mulher: 220 Hz; Crianças: 300 Hz.

A Laringe e as Cordas ou Pregas Vocais



Visão esquemática do fluxo de ar através da glote.



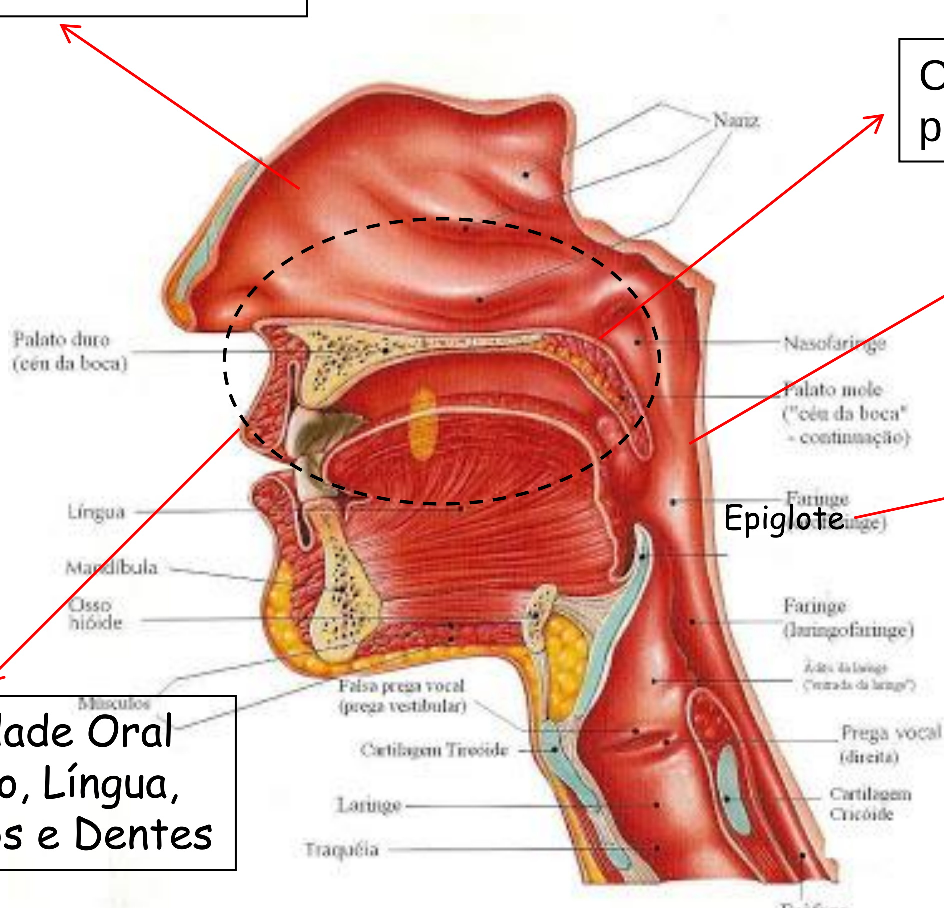
Uma onda triangular no domínio do tempo (topo) e o gráfico de espectro correspondente (embaixo).

A freqüência fundamental é de 220 Hz (Lá2). Cada linha vertical indica a amplitude de uma das freqüências componentes da onda.

O Trato Vocal

O **trato vocal** transforma os zumbidos das pregas vocais nos sons da fala. Isto é realizado através de mudanças na sua forma, o que produz variações nas ressonâncias acústicas.

Homem adulto
12 cm de comprimento
60 cm^3 de volume



Epiglote

Controla o fluxo de ar da faringe para a cavidade nasal

Conecta a laringe com a cavidade oral

Funciona com uma válvula, evitando a passagem de alimentos para a laringe

Cavidade Oral
Palato, Língua,
Lábios e Dentes

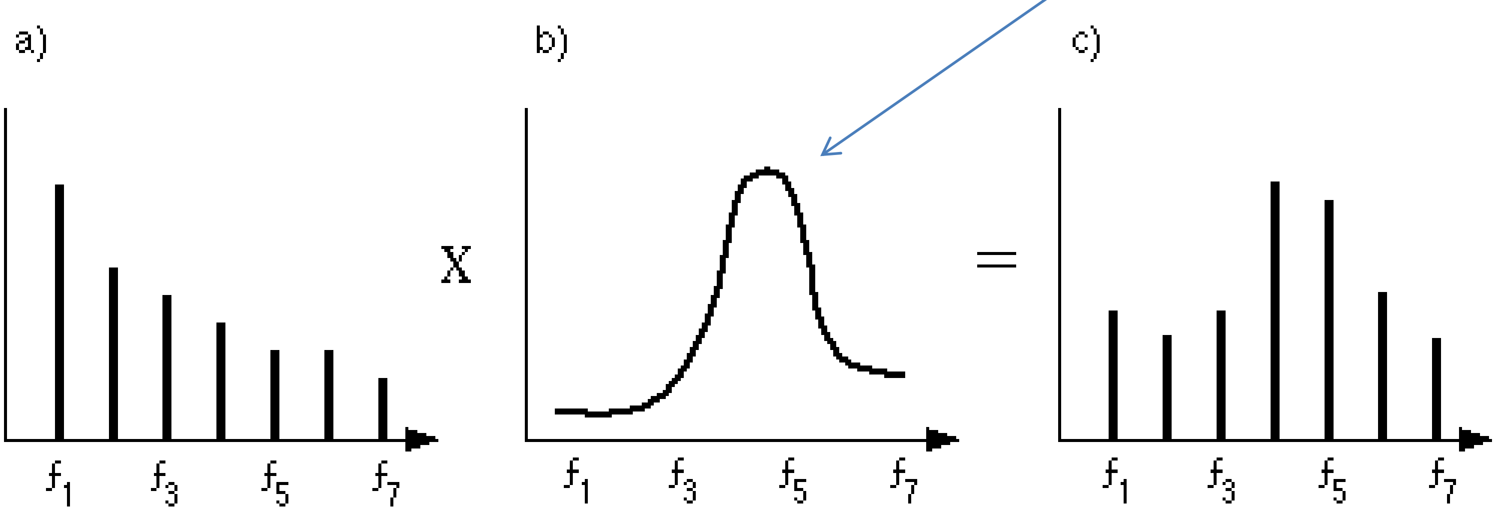
Som da Fala = Fonte x Função Filtro x Eficiência de Radiação

Ressonâncias do Trato Vocal - Formantes

Os formantes podem ser definidos como picos de energia em uma região do espectro sonoro. As parciais que se encontram nessa região de ressonância serão realçados.

Enquanto o espectro de cada nota de um instrumento (fonte) pode variar consideravelmente com a altura, as regiões dos formantes permanecem estáveis, seja qual for a freqüência da nota.

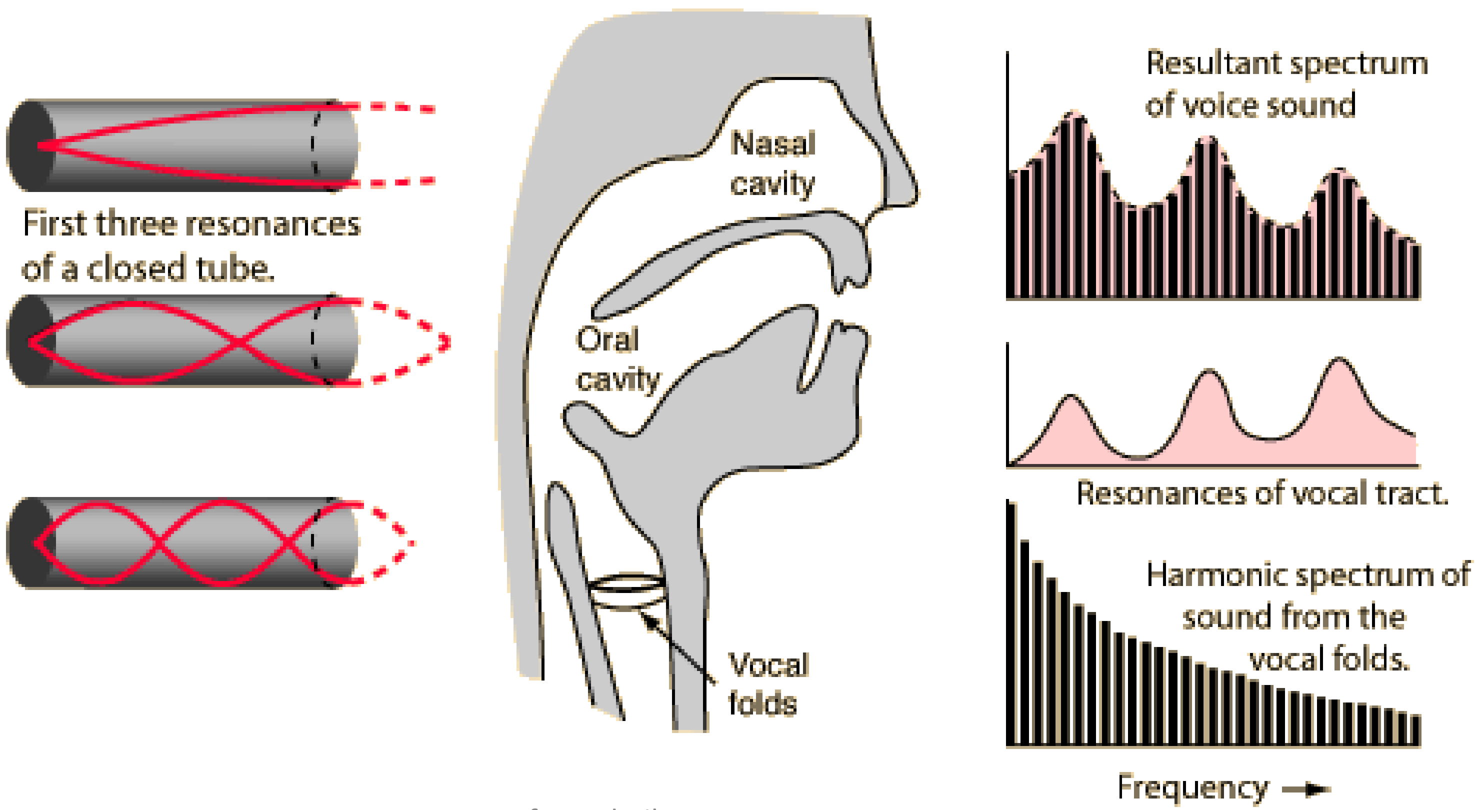
Portanto, os formantes funcionam como uma espécie de assinatura de uma determinada fonte sonora.



Articulação da Fala

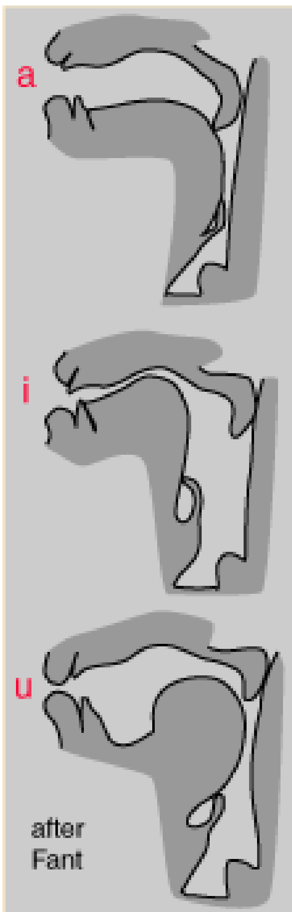
Para produzir sons distinguíveis, como as vogais, o mecanismo vocal deve controlar de algum modo as ressonâncias no trato vocal que produzem as formantes características.

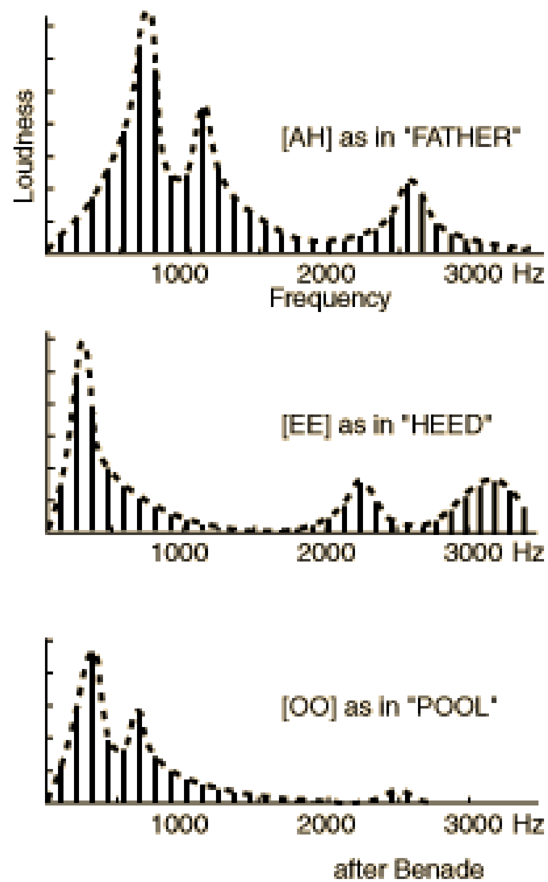
Considerando o trato vocal como uma cavidade ressonante, a posição da língua, a área de abertura da boca e qualquer mudança que afeta o volume na cavidade vão fazer com que a freqüência de ressonância seja alterada.

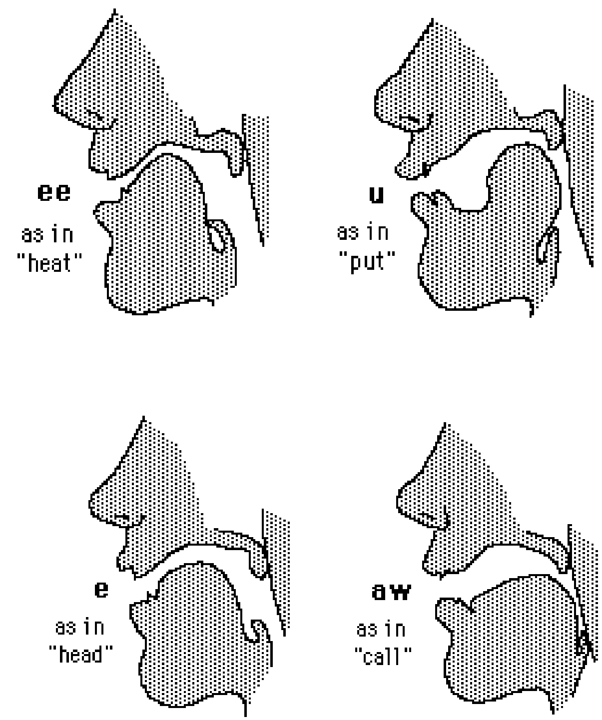


Articulação da Fala

Exemplos das mudanças na forma do mecanismo vocal no processo de articulação, formando diferentes vogais.

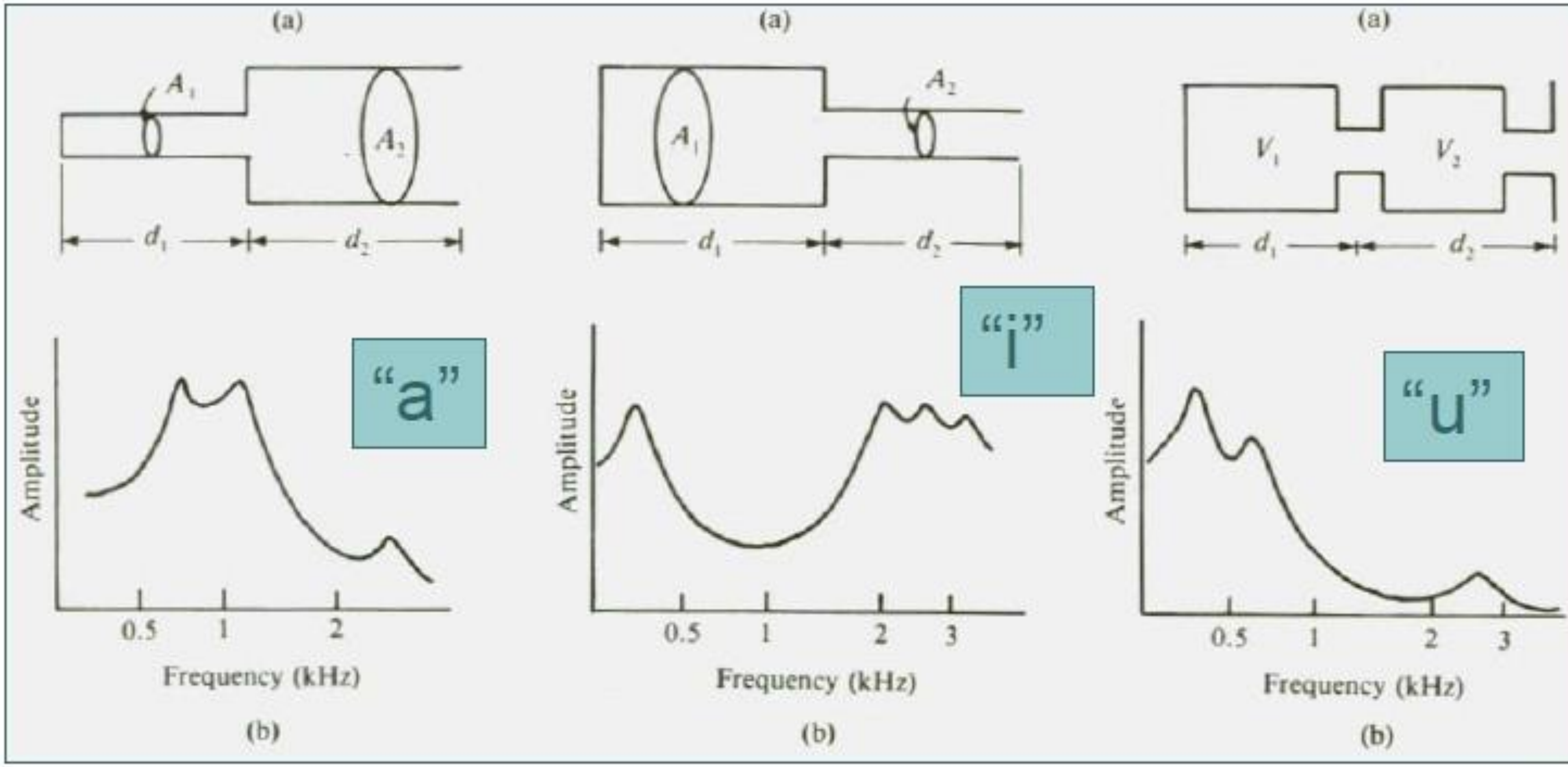






Modelos para o Trato Vocal

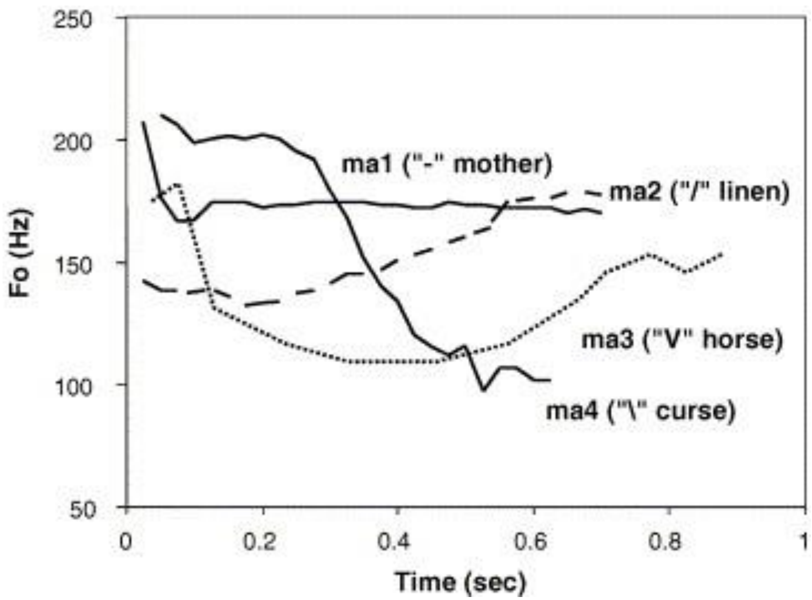
Aproximação, para o trato vocal, em dois tubos, para as vogais altas.



Características Prosódicas da Fala

Prosódia (originário do grego προσωδία) é o estudo do ritmo, entonação e demais atributos correlatos na fala. Ela descreve todas as propriedades acústicas da fala que não podem ser preditas pela transcrição ortográfica (ou similar), em resumo, cuida da correta acentuação tônica das palavras.

Mudanças da frequência com o tempo par tons no Mandarim



As características prosódicas tendem, também, a indicar o estado emocional de quem fala (alegria, tristeza, excitação, etc.)

Wei, C.G; Cao, K. and Zeng, F.G. (2004) "Mandarin tone recognition in cochlear-implant subjects". *Hearing Research*. , **197**:1-2, pp. 87-95.