Módulo 05
Física da Fala e da Audição

ONDAS SONORAS

Prof. Edmilson Manganote
Instituto de Física Gleb Wataghin (IFGW)
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)
mangano@ifi.unicamp.br

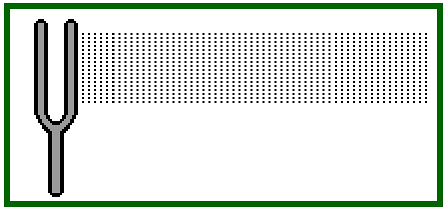
Raios e Trovões: Velocidade do som vs. luz

Qual é a distância aproximada de uma tempestade quando você nota uma diferença de 3 segundos entre ver o raio e ouvir o trovão?

Resposta: 3 segundos $\times$ 340 metros/segundo

= 1020 metros ≈ 1 km

Som



- infrasônico
  - frequências < 20 Hz
- ultrasônico
  - frequências > 20,000 Hz
- intervalo de audição humano
  - frequências entre 20 Hz e 20.000 Hz

O Som

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

Deslocamento do fluido (u) muda a ...

$$\frac{1}{v^2}\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0$$

densidade (δ) que, por sua vez, gera mudança na...

$$\delta(x,t) = \rho - \rho_0 = -\rho_0 \frac{\partial u}{\partial x}$$

pressão (p) que volta a produzir variação no ...

$$p(x,t) = -\rho_0 v^2 \delta(x,t)$$

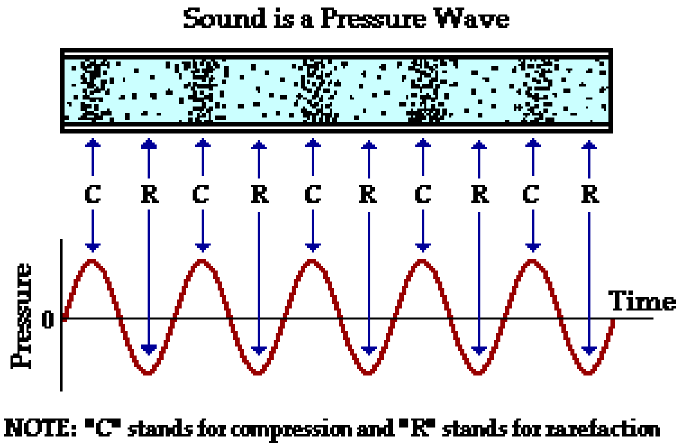
A equação de onda para o som

Onda de pressão

A equação de onda em para o som em um tubo

$$\frac{1}{v^2}\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0$$

$$\frac{1}{v^2} = \frac{k^2}{\omega^2}$$



Velocidades das ondas longitudinais

- A velocidade de ondas longitudinais tem uma forma similar ao caso de uma onda transversal

$$v = \sqrt{\frac{\text{fator elastico}}{\text{fator de inercia}}}$$

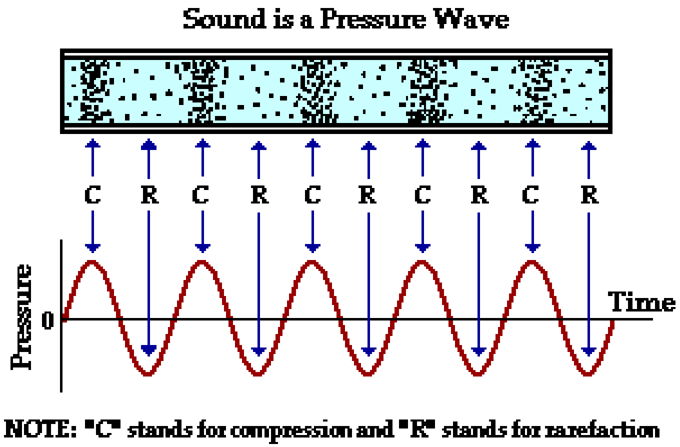
$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad \text{ou} \quad v = \sqrt{\frac{B}{\rho}}$$

Ondas em sólidos

Ondas em gases ou líquidos

E é o módulo elástico do material; *ρ* é a densidade; *B* é o módulo de compressão volumétrico

$$B = -\frac{\Delta p}{\Delta V / V}$$



Velocidades das ondas longitudinais

B é o módulo de compressão volumétrico

$$B = -\frac{\Delta P}{\Delta V / V}$$

A densidade

$$\rho = \frac{M}{V}$$

dai

$$\Delta\rho = -M\,\frac{\Delta V}{V^2} = -\rho\,\frac{\Delta V}{V}$$

No fluido o módulo volumétrico fica

$$B = \rho\left(\frac{\Delta P}{\Delta\rho}\right)$$

Velocidades das ondas longitudinais

As pressões e densidades são $B = \rho\left(\frac{\Delta P}{\Delta \rho}\right)$

$$P = p_0 - p$$

$$\rho = \rho_0 - \delta$$

onde $p \ll p_0$, $\delta \ll \rho_0$

dai

$$\frac{p}{\delta} = \frac{P - p_0}{\rho - \rho_0} = \frac{\Delta P}{\Delta \rho} = \left.\frac{\partial P}{\partial \rho}\right|_o$$

$$\boxed{v = \sqrt{\left(\frac{\Delta P}{\Delta \rho}\right)}}$$

Velocidades das ondas longitudinais

Ondas de som são processos adiabáticos (sem troca de calor) onde

$$P = b\rho^{\gamma}$$

γ é a razão dos calores específicos do gás a pressão constante e volume constante

Gás ideal γ = 1.4

$$\left.\frac{\partial P}{\partial \rho}\right|_{o} = \gamma \frac{P_0}{\rho_0}$$

A velocidade do som

$$v = \sqrt{\gamma \frac{P_0}{\rho_0}}$$

Velocidade do som:exemplos

Velocidade do som no ar

P = 1 atm ≅1.013x10^5 N/m^2 , T = 0^{0}C = 273 K

A densidade do ar é 1,3 kg/m^3

$$v = \sqrt{\gamma \frac{P_0}{\rho_0}}$$

v = 332 m/s em T = 0 ^{0}C

v = 344 m/s em T = 20 ^{0}C

Velocidade do som na água

B = 2.2x10^9 N/m^2 , T = 0^{0}C = 273 K

A densidade da água é aprox. 10^3 kg/m^3

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho_0}}$$

v = 1.483 m/s em T = 0 ^{0}C

Em sólidos esta velocidade chega a valores da ordem de 3.000 m/s

Intensidade

Onda sonora harmônica de deslocamento u num tubo cilíndrico

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

O comprimento de onda λ é $\lambda = v\,\tau = v/f$

A frequência *f* para ondas sonoras varia entre 20Hz e 20 KHz.
Como a velocidade do som no ar é de 340 m/s os comprimentos de onda do som no ar variam entre 1,7cm e 17 m.

Onda sonora harmônica de pressão

$$p(x,t) = -\rho_0 v^2 \frac{\partial u}{\partial x} \Rightarrow p(x,t) = \wp \sin(kx - \omega t + \phi)$$

onde $\wp = \rho_0 v^2 k U$

As ondas de deslocamento e pressão estão em quadratura
(defasadas de 90^0 entre si)

Intensidade

A força exercida sobre uma camada do fluido é

$$F = p(x,t)A = \wp A \sin(kx - \omega t + \phi)$$

A potência instantânea

$$F\frac{\partial u}{\partial t} = \omega A \wp U \sin^2(kx - \omega t + \phi)$$

A potência média dividida pela área *A* é a intensidade

$$I = \frac{1}{A}\overline{F\frac{\partial u}{\partial t}} = \frac{1}{2}\omega \wp U \qquad I = \frac{1}{2}\rho_0 v \omega^2 U^2$$

Intensidade

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

$$\wp = \rho_0 v^2 k U$$

$$I = \frac{1}{2}\frac{\wp^2}{\rho^2 v}$$

Limiar de audibilidade, som mais fraco que pode ser ouvido ($f = 10^3\ s^{-1}$)

No ar, $\rho_0 \cong 1.3\ kg/m^3$, $v \cong 340 m/s$

$\wp \cong 3x10^{-5}\ N/m^2$

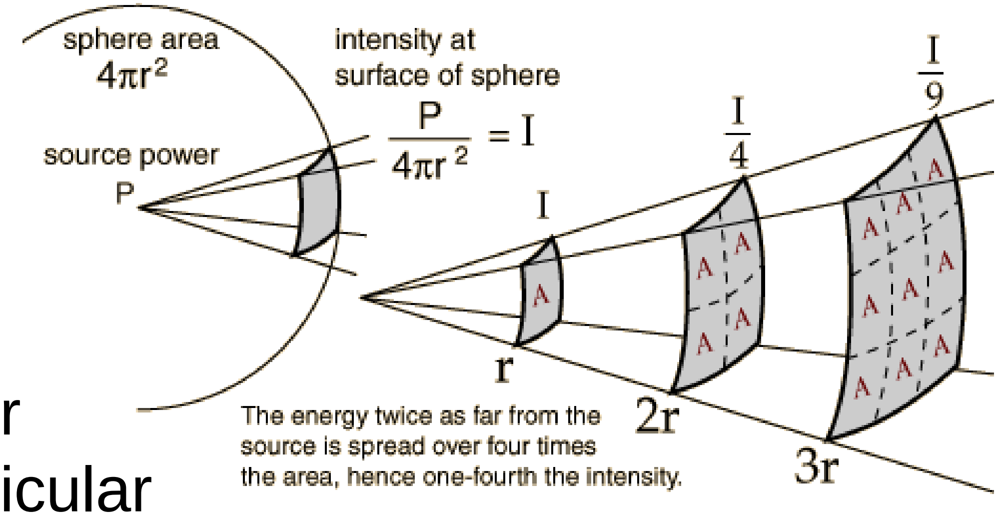
$I_0 = 10^{-12}\ W/m^2$

Limiar de dor, intensidade sonora máxima que o ouvido pode tolerar

$I_m = 1\ W/m^2$

A variação é de 10^{12}!!

Intensidade em 3-D



- Ondas transportam energia.
- Intensidade *I* de uma onda:
  - Potência transportada por unidade de área perpendicular ao fluxo de energia.

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

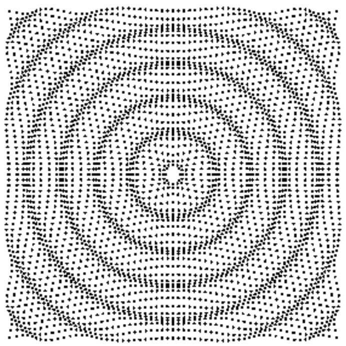
- Mas, como a energia é proporcional à amplitude ao quadrado:

$$I \propto A^2$$

Intensidade em 3-D

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

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



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

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).

Decibel

O nível de intensidade em deciBels (dB) é dado por

10 x log da razão de intensidades = $10 \times \log_{10}(I/I_o)$

I – Intensidade medida em Wm^{-2} e

I_o – Intensidade de Referência,

Nível de Intensidade Sonora (NIS) – Sound Intensity Level (SIL)

Utilizando-se a equação anterior, e utilizando a intensidade de referência como $10^{-12} W/m^2$ (10^{-16} W/cm^2) por ser esta a mínima intensidade sonora audível temos:

$$NIS = 10 \log (I / I_0)$$

Se a intensidade do som é dobrada tem-se apenas um aumento de 3dB no nívelde intensidade sonora.

Decibel

160
150
140
130
120
110
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0

Turbina de avião, caixa da bateria a 10cm

Cantor de rock gritando no microfone

(limiar da dor)

Pico de um piano
94 dB SPL, teste de sensibilidade de microfones
Violão dedilhado a 30cm
74 dB SPL, teste de sensibilidade de microfones
Bate papo normal

Cochicho
Nível de ruído em um estúdio de gravação

Limiar da audição para jovens 10^{-16} watt/cm^2

Níveis de Intensidade e Pressão

<u>Nível de Pressão Sonora - Sound pressure level, dB</u>

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

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

<u>Nível de Intensidade Sonora - Sound intensity level, dB</u>

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

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

<u>Nível de Potência Sonora – Sound power level, dB</u>

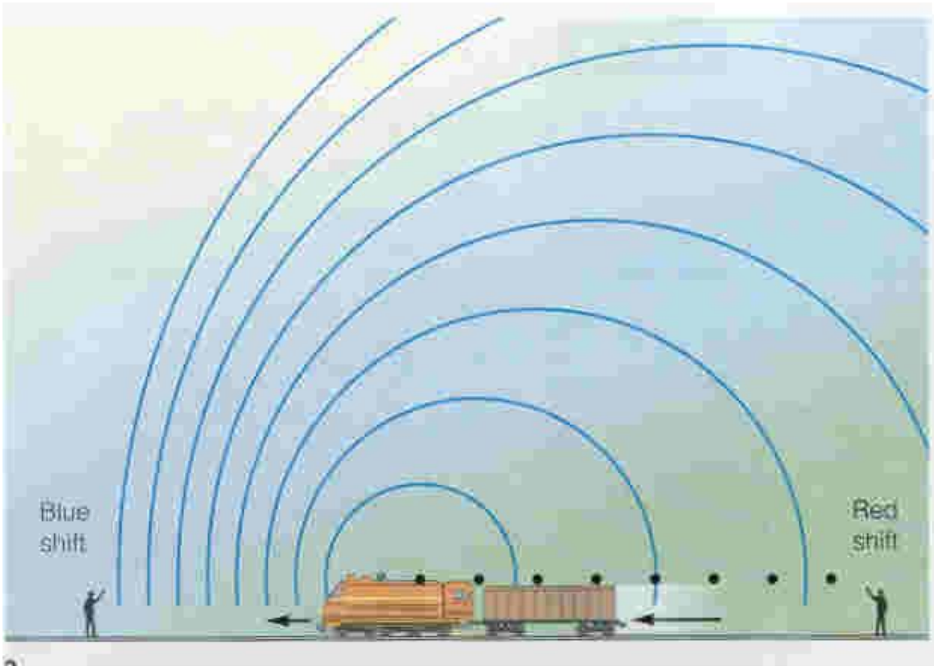
$$SWL = 10 \log (W/W_{ref})$$

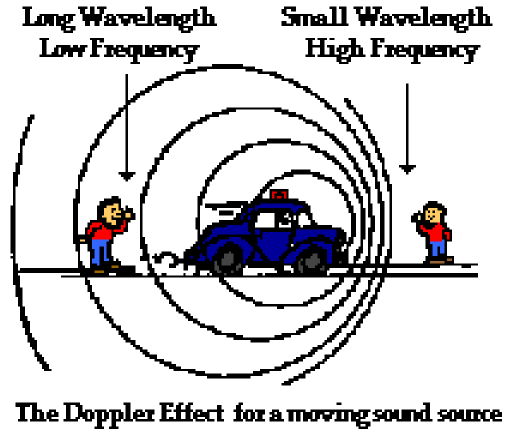
onde $W_{ref} = 10^{-12}$ Watts

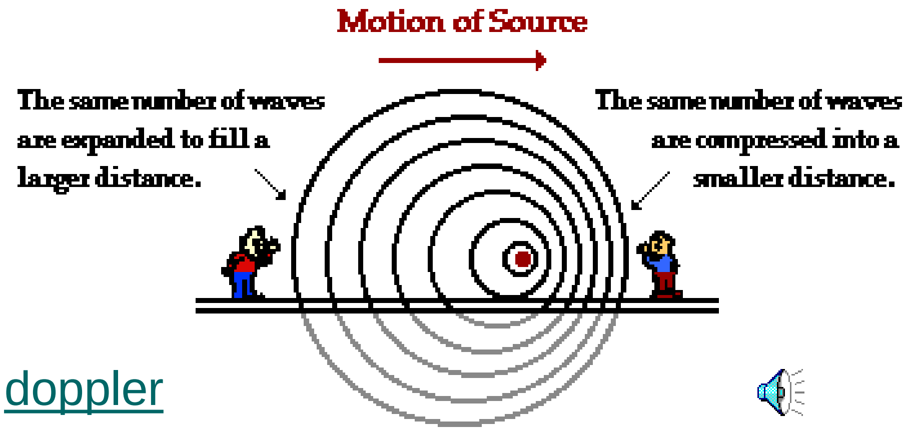
Efeito Doppler

$$f = \frac{\left(1 \pm \frac{u}{v}\right)}{\left(1 \mp \frac{V}{v}\right)}$$

- Mudança na frequência da onda devida ao movimento relativo entre a fonte e observador.







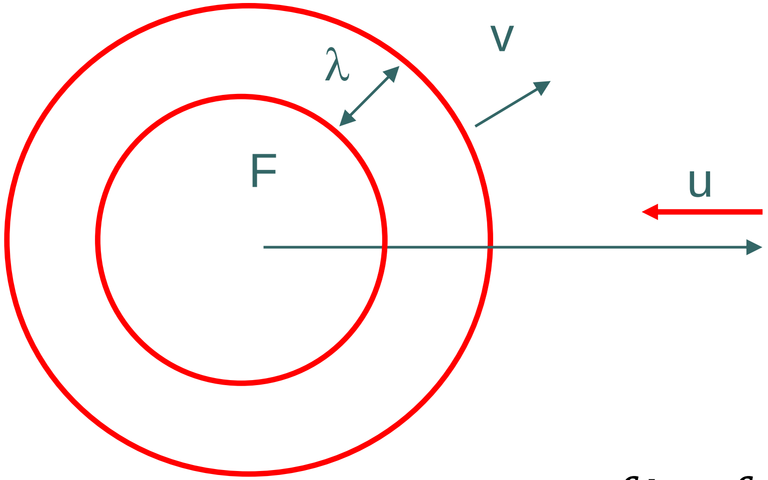
[doppler]

Efeito Doppler

- Fonte parada, observador com velocidade u

$$f' = \frac{v}{\lambda_0} + \frac{u}{\lambda_0}$$

$$f' = f_0\left(1 + \frac{u}{v_0}\right)$$



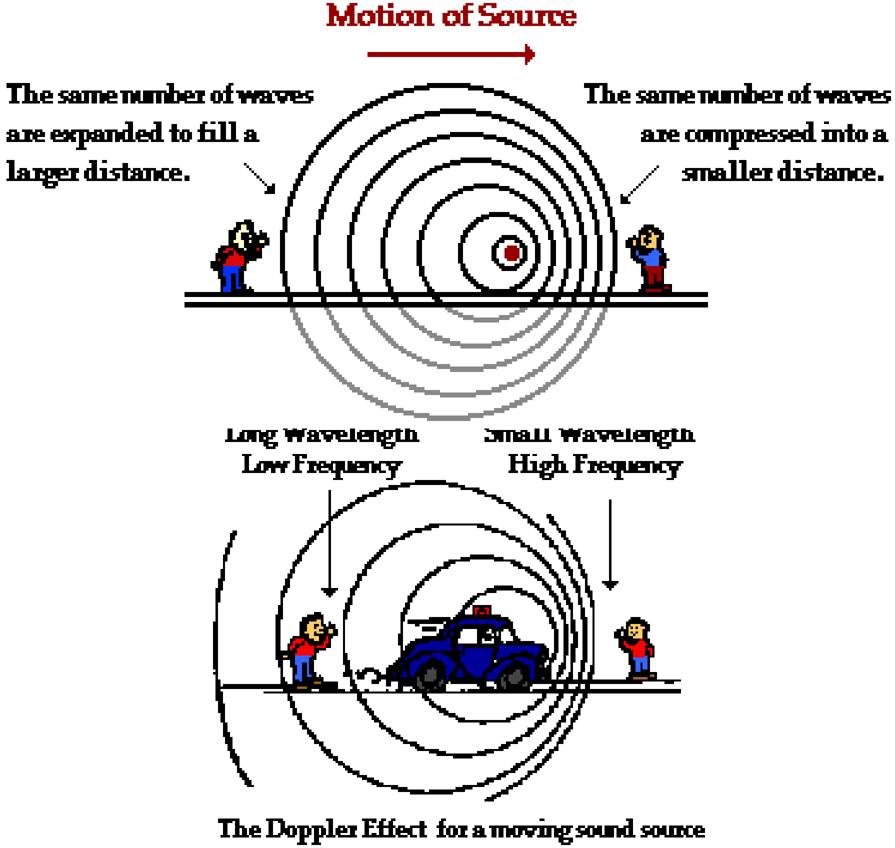
A frequência aumenta

$$f' = f_0\left(1 \pm \frac{u}{v_0}\right)$$

+ aproximação
- afastamento

Efeito Doppler

- Movimento da fonte se aproximando



$$\lambda = \underset{\uparrow\,\lambda_0}{vT_0} - VT_0$$

$$\lambda = \lambda_0\left(1 - \frac{V}{v}\right)$$

Em termos de frequências

$$f = \frac{f_0}{\left(1 - \frac{V}{v}\right)}$$

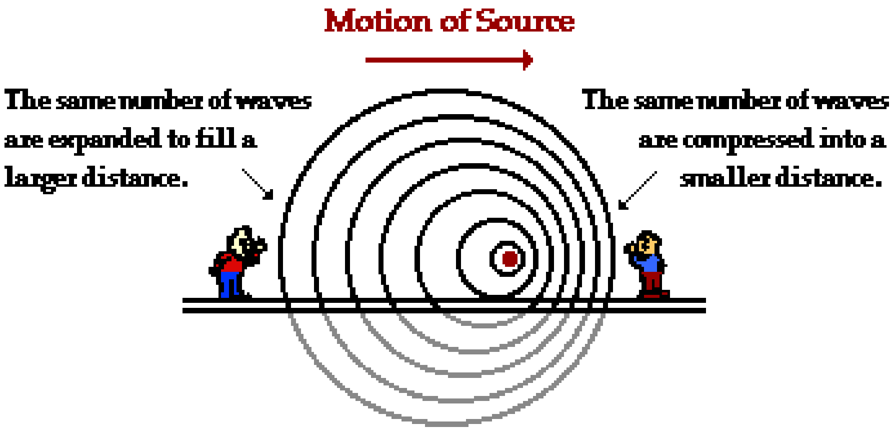
Efeito Doppler

- Movimento da fonte se aproximando ou afastando

Em termos de frequências

$$f = \frac{f_0}{\left(1 \mp \frac{V}{v}\right)}$$

- aproximação
+ afastamento

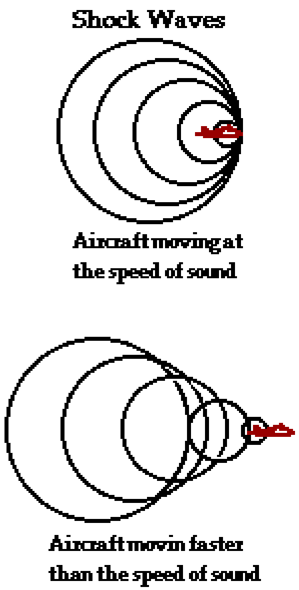


Caso geral

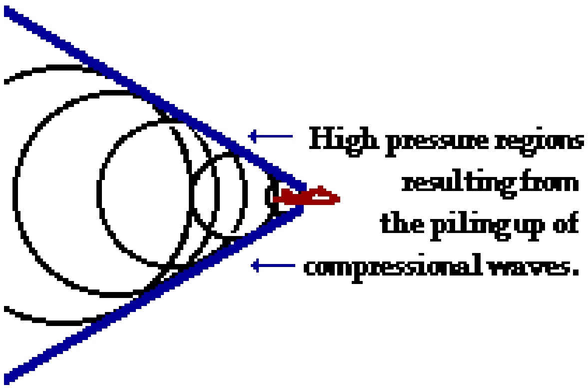
$$\boxed{f = \frac{\left(1 \pm \frac{u}{v}\right)}{\left(1 \mp \frac{V}{v}\right)}}$$

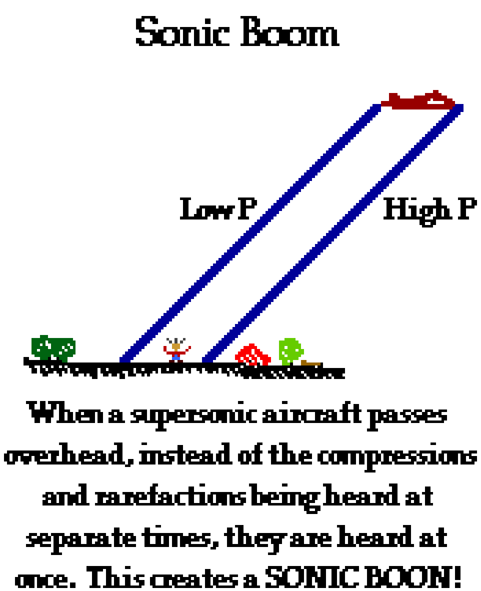
Velocidade do Som

- Subsônico: Mais lento que a velocidade do som
- Supersônico: Mais rápido que a velocidade do Som
- Número Mach = $\dfrac{\text{Velocidade do objeto}}{\text{Velocidade do som}}$



Ondas de Choque





- Assim como ondas circulares emergem de um inseto que nada, ondas esféricas emergem de um objeto que se desloca. Se o objeto se desloca a uma velocidade maior que a das ondas, o resultado é uma onda de choque em forma de cone.
- Ouvem-se dois “booms”, um da frente do objeto voador, e o outro da parte de trás.

Efeito Doppler

Mach 0

Mach 0,7

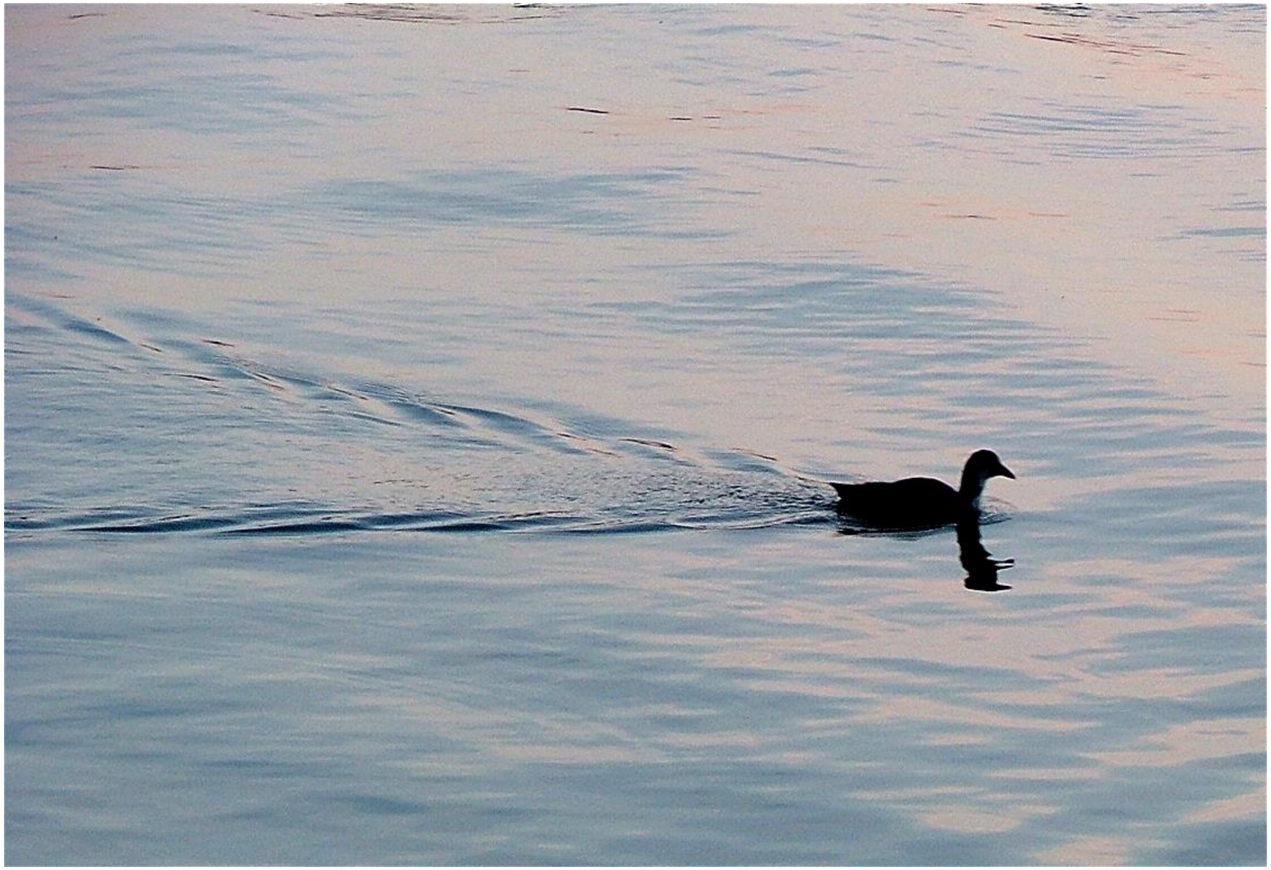
Mach 1

Mach 1,3

sonic-boom

Onda de Choque

Onda de choque...



Sons musicais

Característica do som musica,
PERIODICIDADE

Sons musicais

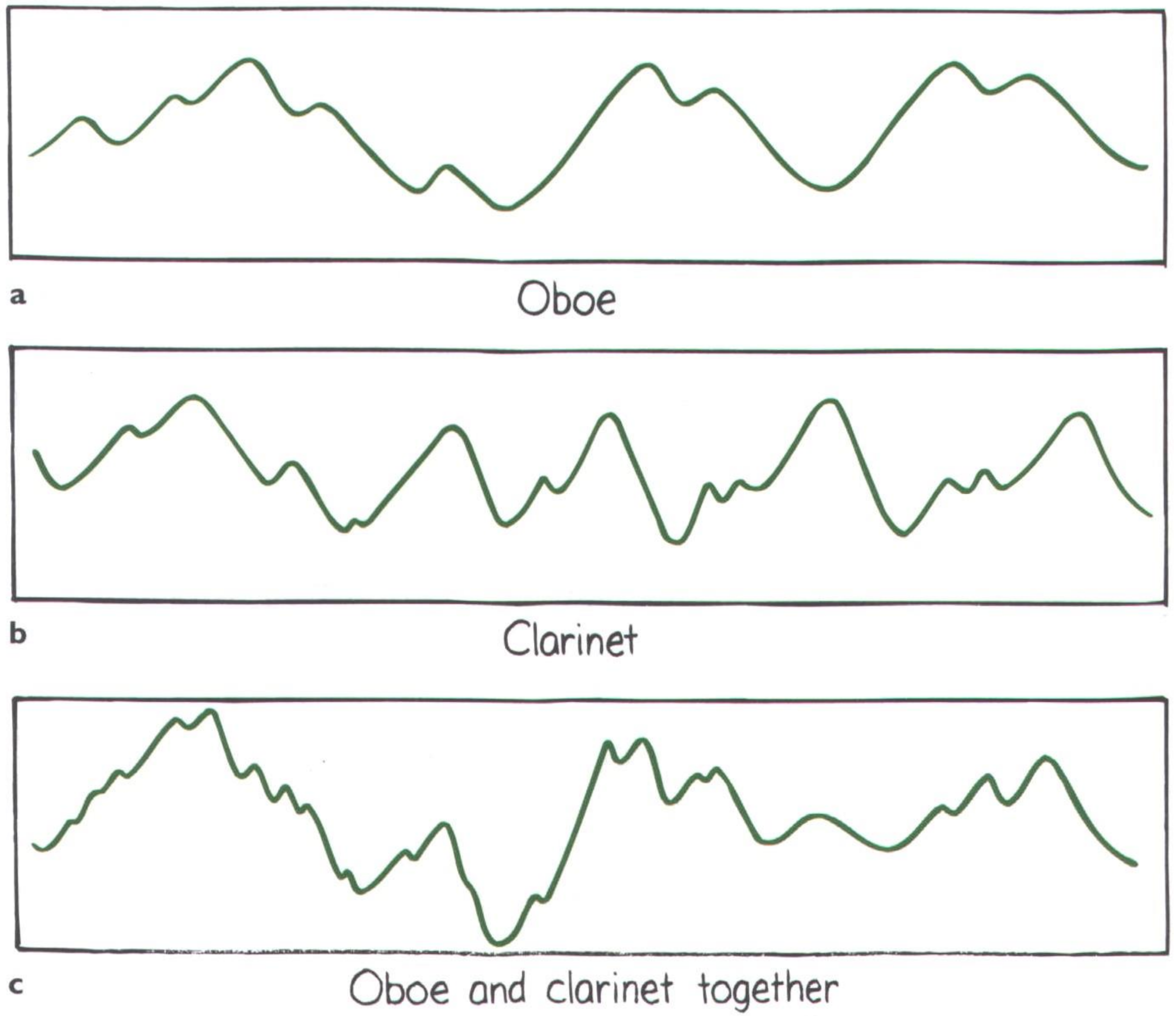
- Intensidade
- Altura
- Timbre

Intensidade, está relacionada com a amplitude da onda

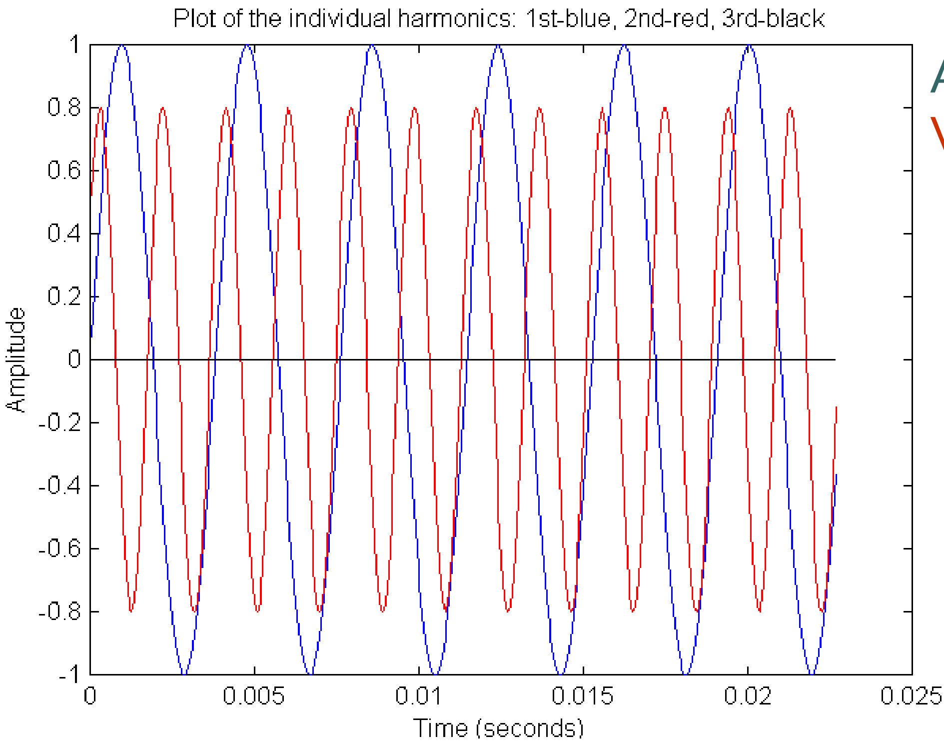
Altura, mais grave ou mais agudo, $f = 1/\tau$. Quanto maior f , mais agudo é o som

Timbre, representa a coloração do som, é o que distingue a diferença entre o lá do piano e o mesmo lá do saxofone

Timbre



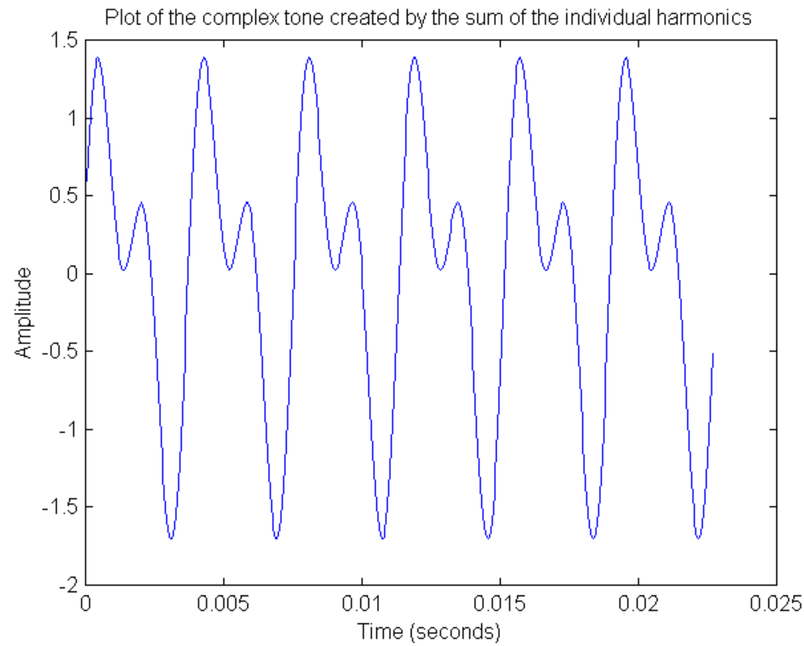
Timbre



Azul 262 Hz

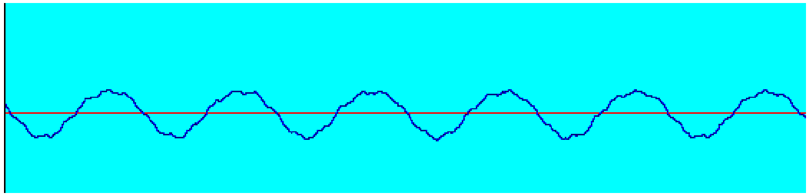
Vermelho 524 Hz

Som complexo

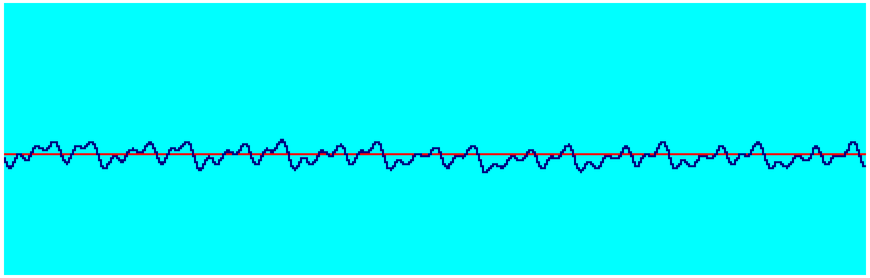


Nota lá- 440Hz

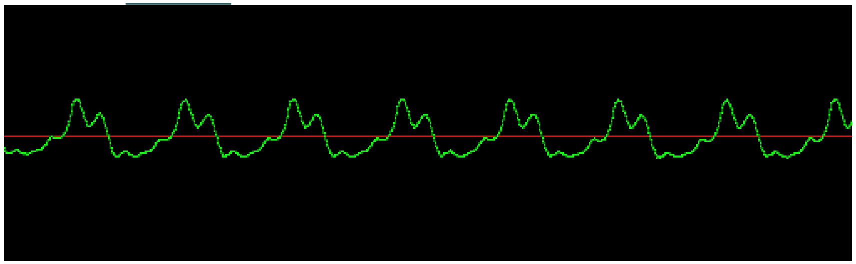
Diapasão



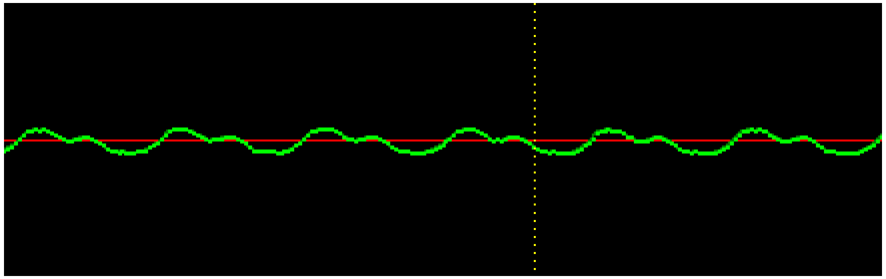
Teclado



Sax tenor

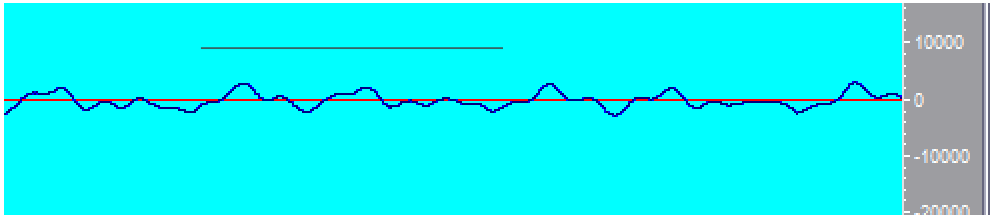


Flauta transversal

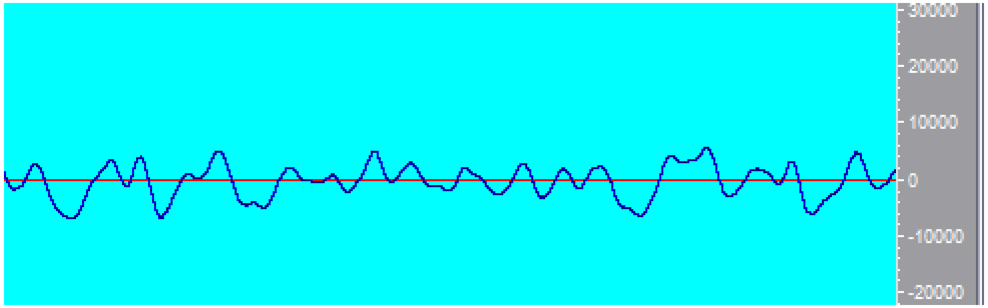


Teclado

dó



Acorde
Dó-Mi-Sol



Escala musical natural

Nota	dó C	ré D	mi E	fá F	sol G	lá A	si B	Dó C
inter	T	T seg	T ter	ST qua	T qui	T sex	ST sét	oit

Se tocamos dó, f_1 =261,6256 Hz e os seus harmônicos temos

f_2 = 2 f_1, f_2 = 523,2511 Hz = dó uma oitava acima

f_3 = 3 f_1, f_3 = 784,9668 Hz = sol uma oitava acima
sol_2 f = 784,9668 Hz sol_1 f = 392,4834 Hz

f_5 = 3 f_1, f_5 = 1308,278 Hz = mi duas oitavas acima
mi_3 f= 1308,278 mi_2 f = 654,139 Hz mi_1 f = 327,0695 Hz

Instrumentos harmônicos como o piano tocam acordes como do, mi sol todos na mesma oitava e devido as relações acima o som resultante fica muito harmonioso!

Escala temperada maior

Notas	No. do intervalo	Freqüências	L sem correção
C	---	261,6256	32,77
D	1	293,6648	29,20
E	1	329,6276	26,01
F	½	349,2282	24,55
G	1	391,9954	21,87
A	1	440,0000	19,48
B	1	493,8833	17,36
C	½	523,2511	16,38
-		Hz	cm

Escala cromática (12 tons)

nota	dó	dó#	ré	ré#	mi	fá	fá#	sol	sol#	lá	lá#	si	dó
temperado	1	$2^{1/12}$	$2^{2/12}$	$2^{3/12}$	$2^{4/12}$	$2^{5/12}$	$2^{6/12}$	$2^{7/12}$	$2^{8/12}$	$2^{9/12}$	$2^{10/12}$	$2^{11/12}$	2
Freqüência	262	277	294	311	330	349	370	392	415	440	466	494	523

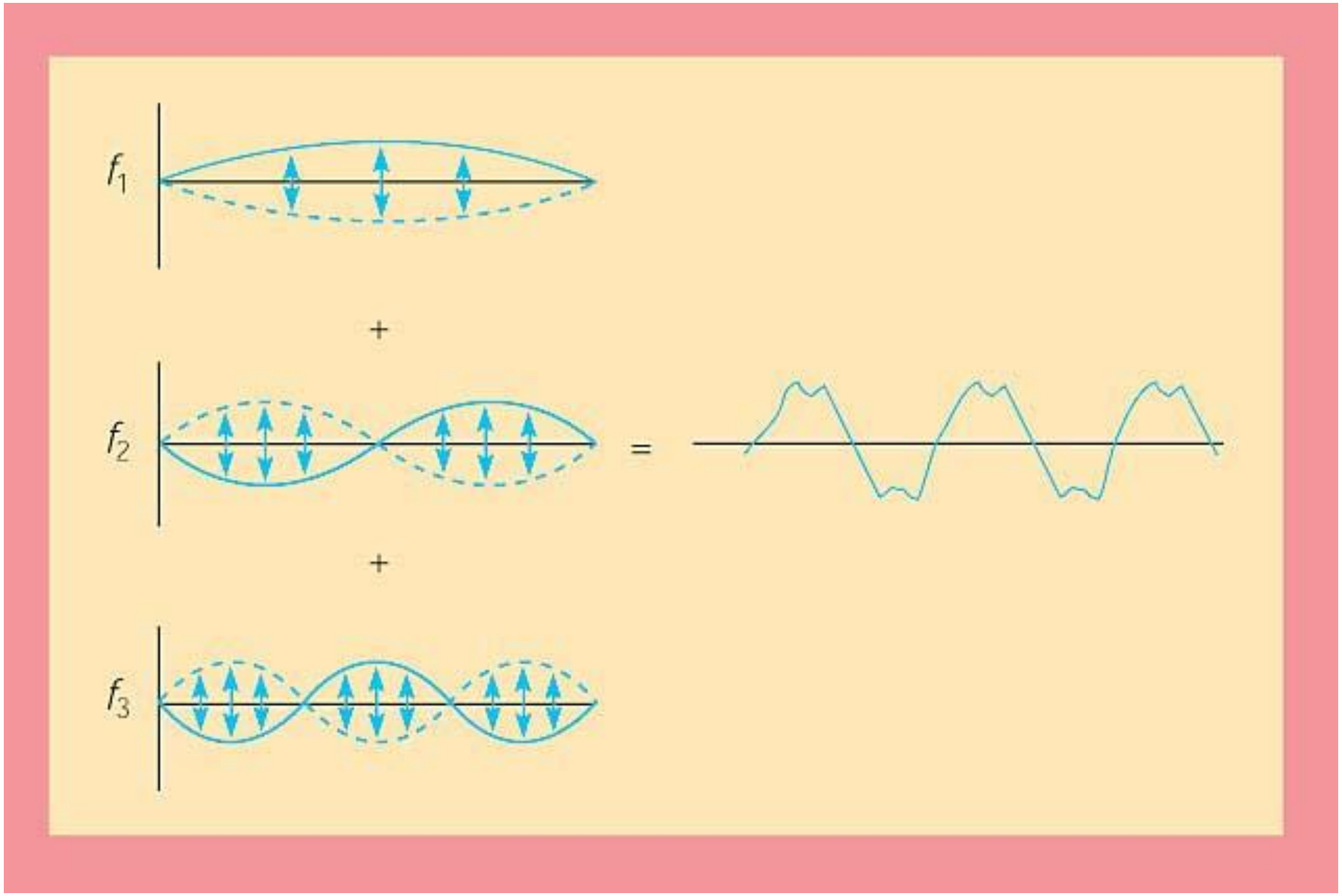
Belo site:

http://www.phys.unsw.edu.au/music/

Apoio de Johann Sebastian Bach séc XVIII, escala com igual temperamento. Isto tornou a música muito mais interessante e simples.

Combinação de Freqüências

- A combinação entre a frequência fundamental e sobretons produz uma forma de onda complexa, que dá a característica da qualidade sonora.



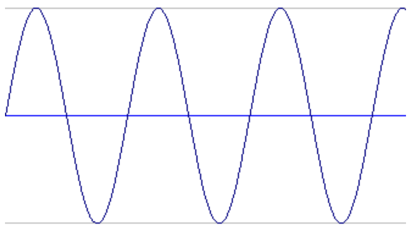
Conteúdo Harmônico

- Simples (senoidal): **Não existe em geral na natureza!**
  - $\boldsymbol{x(t) = A \sin(\omega t + \theta)}$

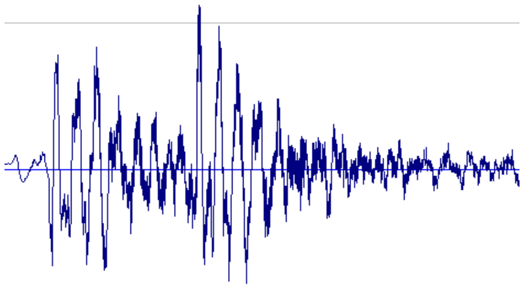
    A = amplitude

    ω= freqüência angular

    θ = fase inicial

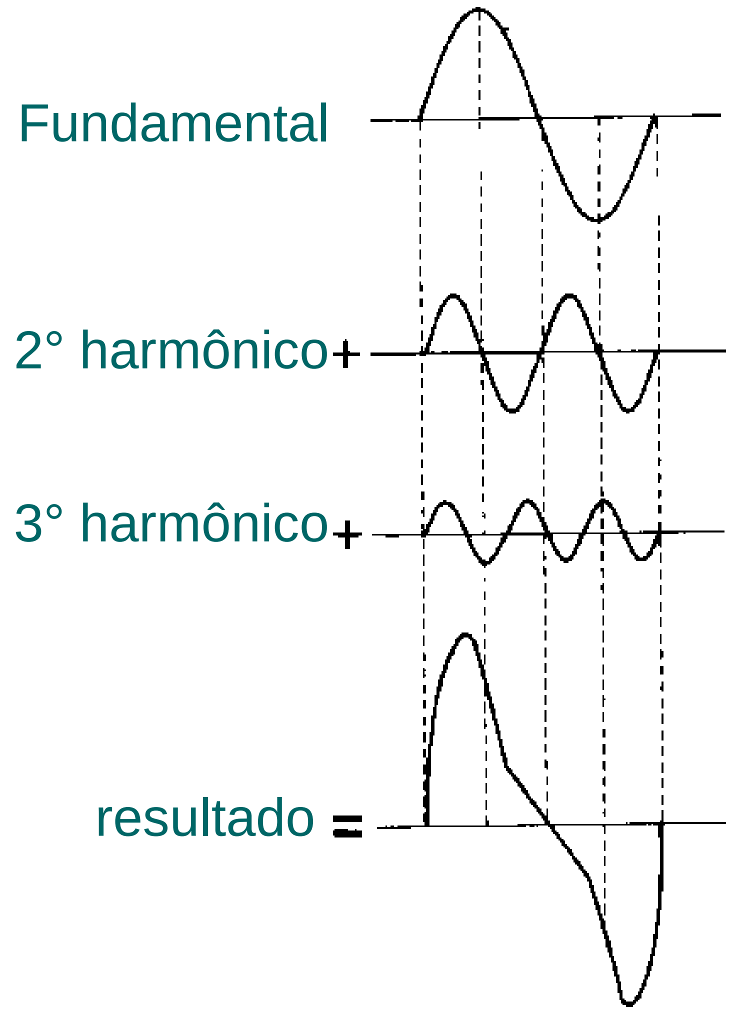


- Complexa (composta de senoidais):
  - $f(t) = a_k + a_0 \sin \omega_0 t_0 + a_1 \sin \omega_1 t_1 + \ldots + a_n \sin \omega_n t_n$
  - $f_0 = \omega_0 / 2\pi$ é chamada de **freqüência fundamental**
  - as outras são chamadas de **parciais**
  - **harmônico** = parcial ou múltiplo de f_0



Onda complexa: exemplo

- O conteúdo harmônico
  - é um dos responsáveis pelo **timbre** de um instrumento
  - é chamado **Resposta em Freqüência** ou **Espectro**
- Síntese aditiva:
  - Toda onda pode, teoricamente, ser obtida a partir de senóides
  - Instrumentos percussivos têm parciais não harmônicas



Análise da Forma de Onda

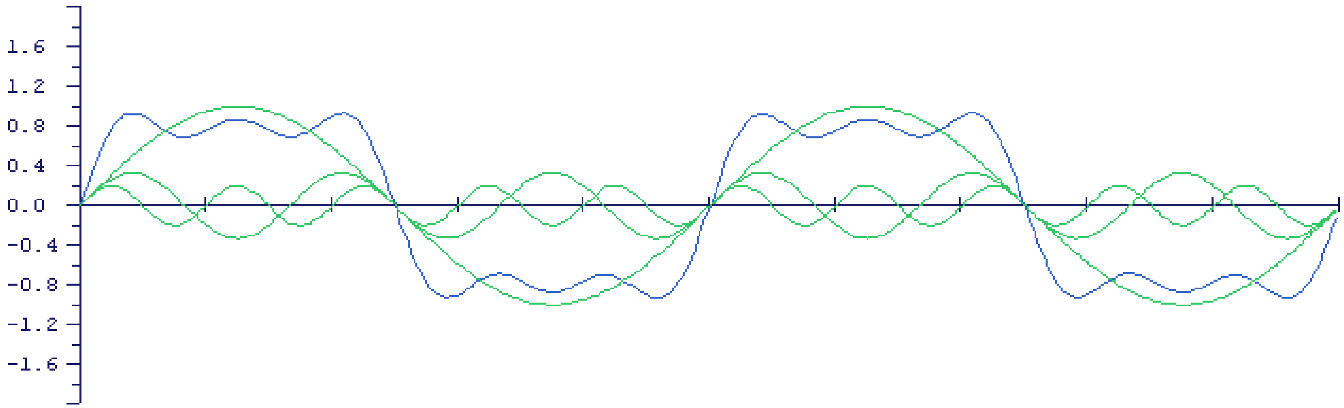
- Ondas periódicas complexas
- Conceito principal:
  - **Se** pudermos reduzir uma onda complexa periódica a uma combinação de ondas periódicas simples, **então** poderemos descrevê-las usando informação sobre a freqüência, amplitude e fase de cada onda periódica simples.
- Joseph Fourier (1768-1830)

Análise Harmônica

- Fourier mostrou
  - Que é possível reduzir uma onda complexa em uma soma de ondas senoidais.
  - As únicas ondas senoidais necessárias são ondas com freqüências que são múltiplos inteiros da freqüência fundamental.

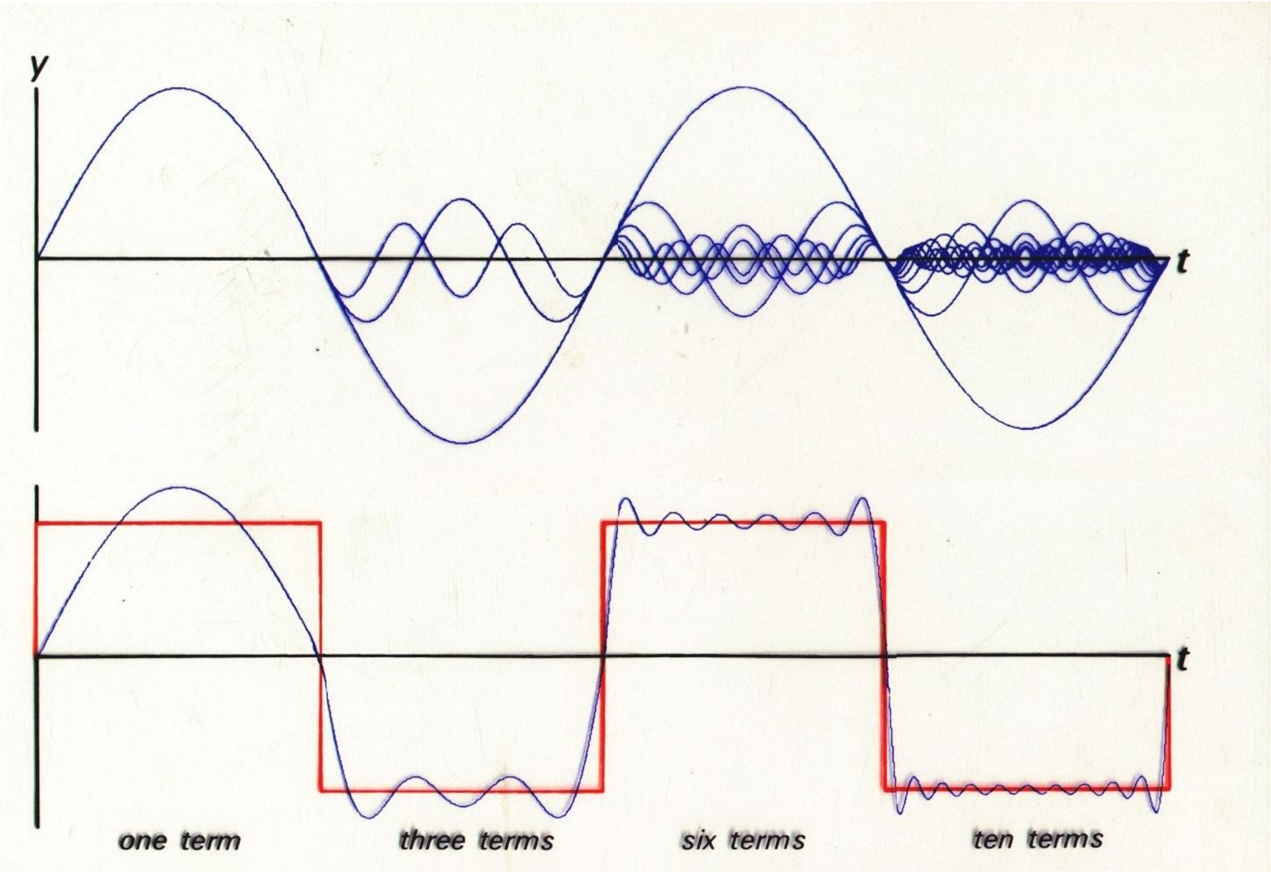
Análise Harmônica

- Exemplo: Construir uma onda quadrada



  - Frequência de repetição = 200Hz
  - Ondas senoidais de 200Hz, 600Hz, 1000Hz

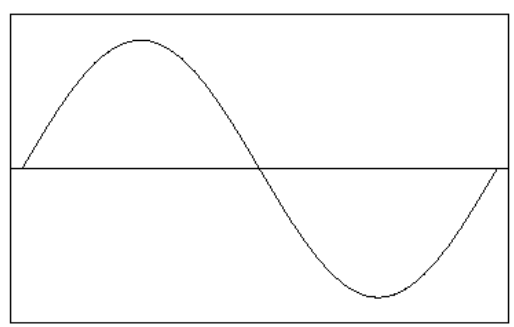
Análise Harmônica



Análise Harmônica

- Podemos listar os resultados da análise
  - Para construir uma onda quadrada, pegue
    - 1.00 do Harmônico 1
    - 0.33 do Harmônico 3
    - 0.20 do Harmônico 5
    - etc…

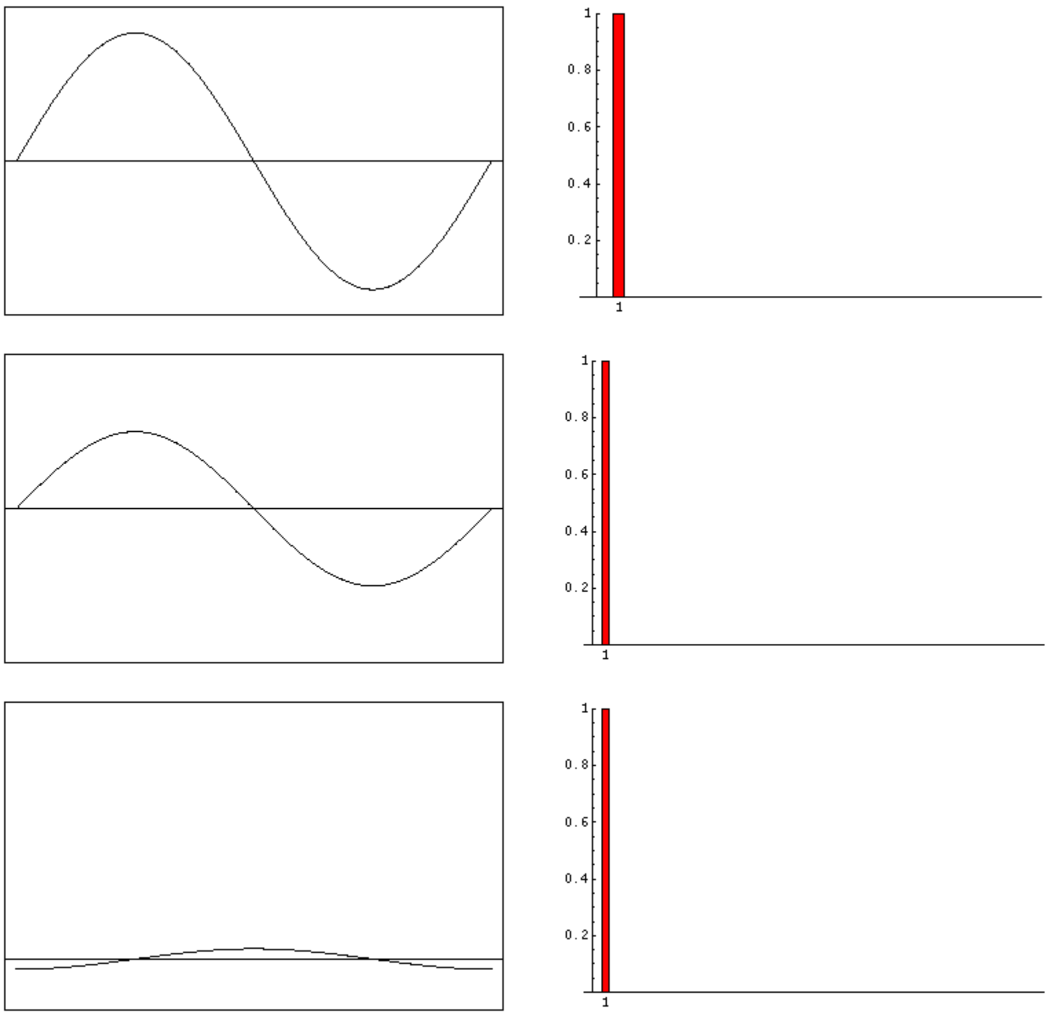
Ou pode-se graficar o resultado:



Análise Harmônica

- Frequência de repetição
  - “Freqüência Fundamental”
- Ondas com frequência múltiplo inteiro da freqüência fundamental “Harmônicos”
- Para medir uma forma de onda complexa:
  - listar a amplitude e a fase de cada harmônico

Ondas complexas em geral

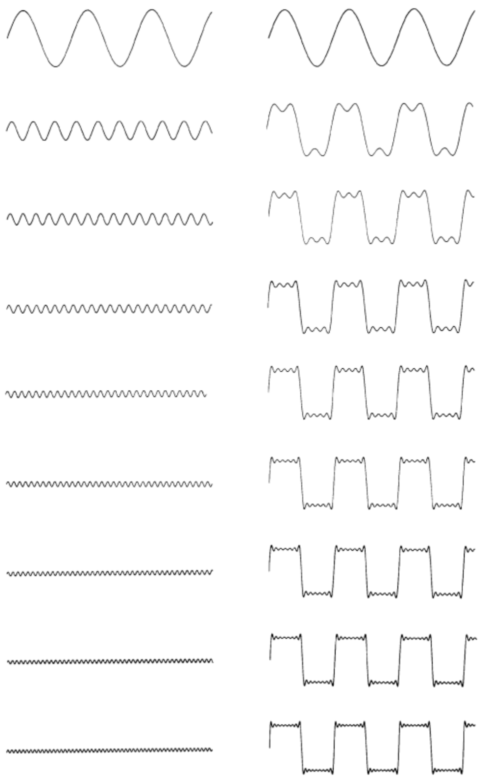


Séries de Fourier

$$f(t) = c_0 + \sum a_n \cos(n\omega t) + \sum b_n \sin(n\omega t)$$

$1/1 \sin(2\pi t) + 1/3 \sin(2\pi 3t) + 1/5 \sin(2\pi 5t) + 1/7 \sin(2\pi 7t) + \ldots..$

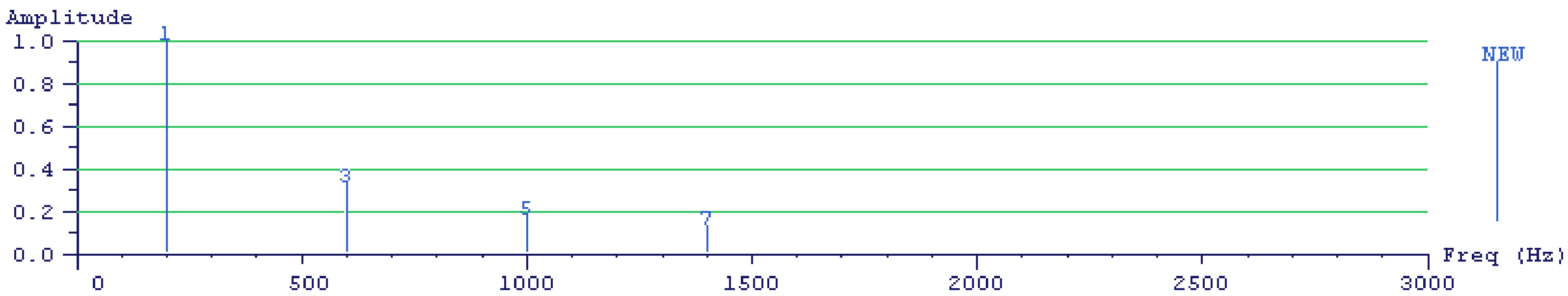
f (Hz)	A (m)
1	1
3	1/3
5	1/5
7	1/7
9	1/9
11	1/11
13	1/13
15	1/15
17	1/17



(naar J.G. Roederer, 1995)

Análise Espectral

- Gráfico do resultado de uma análise harmônica
  - "Espectro"



  - Freqüência do Harmônico: eixo horizontal
  - Amplitude do Harmônico: eixo vertical
  - Fase do Harmônico: não mostrada

fourier