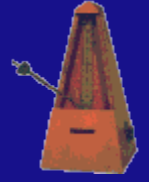
Instituto de Projetos e Estudos em Educação



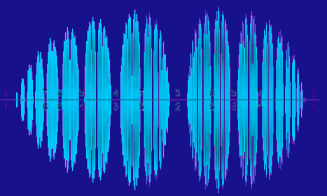
A FÍSICA DA MÚSICA

Carlos Alexandre Wuensche

Seminários sobre o ensino de Física

São Paulo, 06 de agosto de 2005

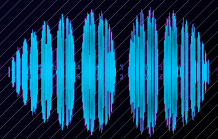
http://www.das.inpe.br/~alex/fismus_indice.htm



Instituto de Projetos e Estudos em Educação

INTRODUÇÃO

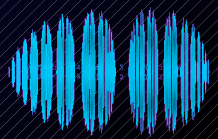
- O que é o som?
- Qual é a relação entre som e música?
- Associação de uma fração a um intervalo musical ⇒ um dos princípios básicos da acústica.
- Produção e análise dos sons ⇒ Acústica.



Instituto de Projetos e Estudos em Educação

Histórico

- Escola Pitagórica (séc. VI a.C.): relação entre os comprimentos das cordas de uma lira e as notas musicais.
- Teoria relacionando comprimentos de cordas, escalas, intervalos, notas, números inteiros e frações.
- Fração aritmética *x* intervalo musical ➔ Teoria da música ocidental
- Relação entre a Física e a Música:
  - Teoria ondulatória (sécs. XVII e XVIII)
  - Análise de Fourier (início do séc. XIX)



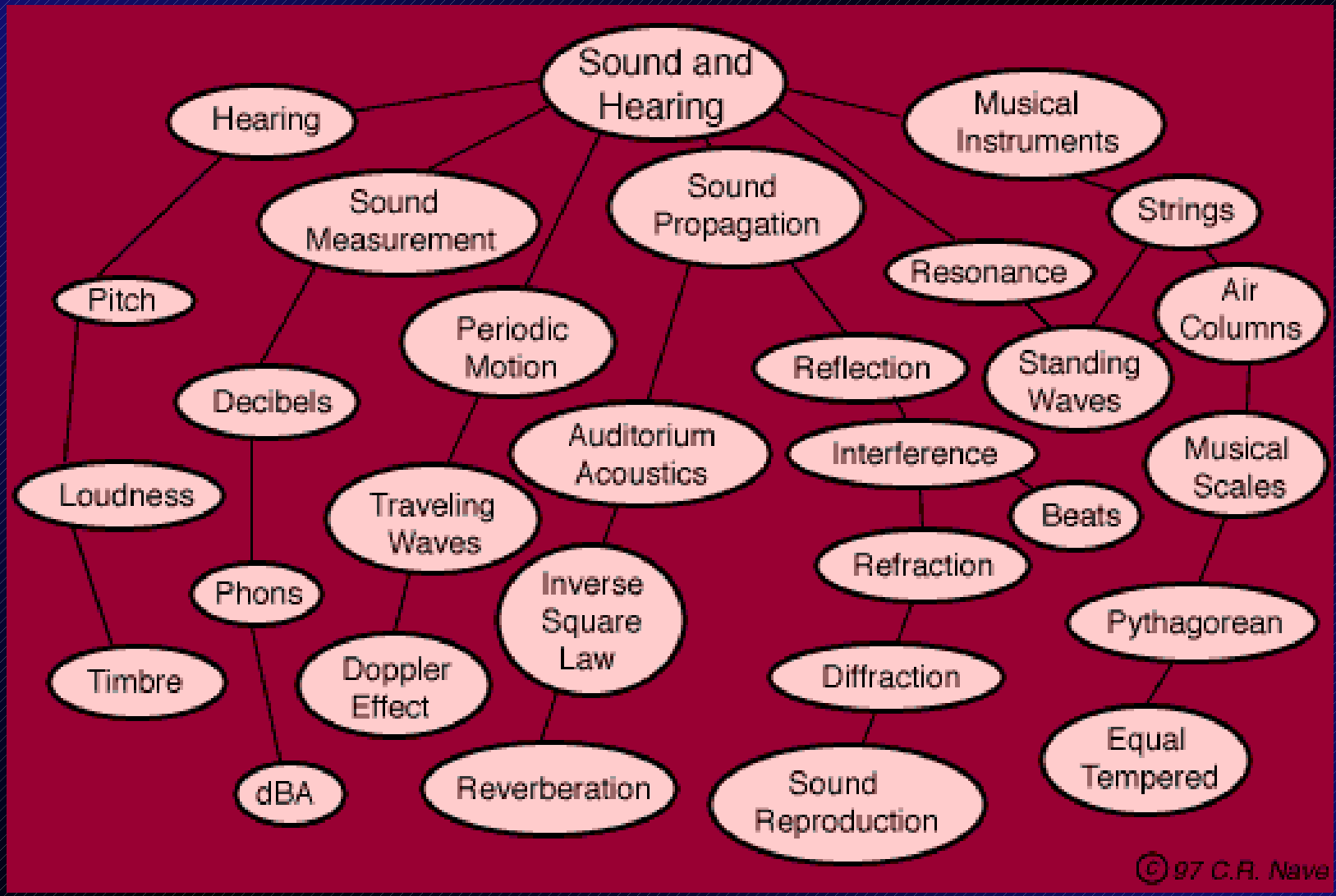
As 7 artes liberais

Quadrivium (Saberes Exatos)

- Geometria
- Aritmética
- Música
- Astronomia

Trivium (Saberes Humanos)

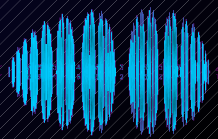
- Dialética
- Gramática
- Retórica



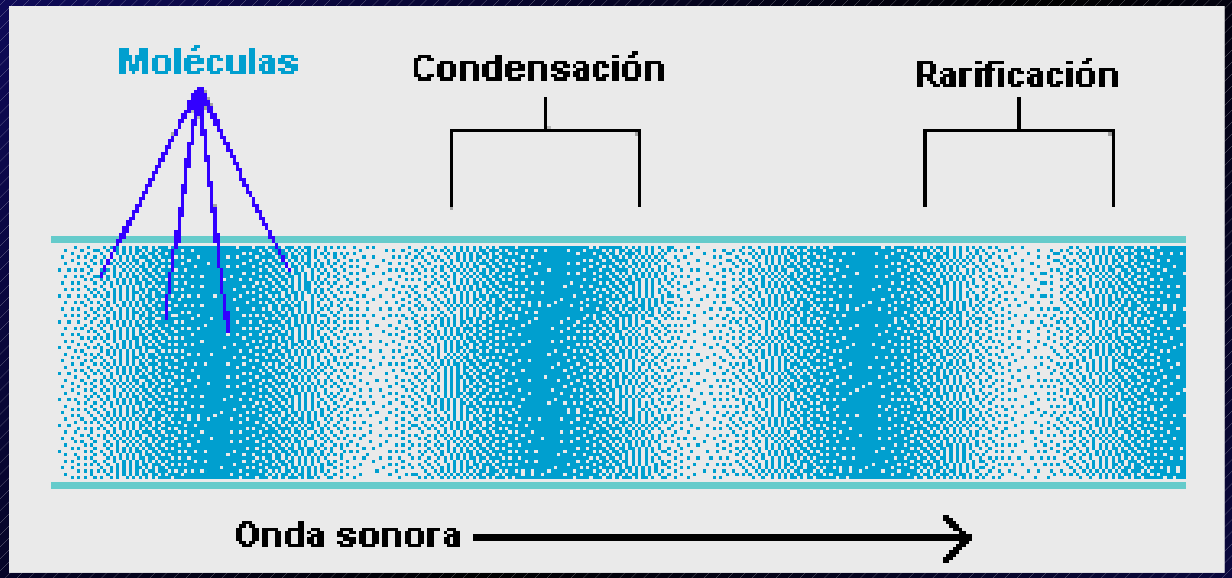
Instituto de Projetos e Estudos em Educação

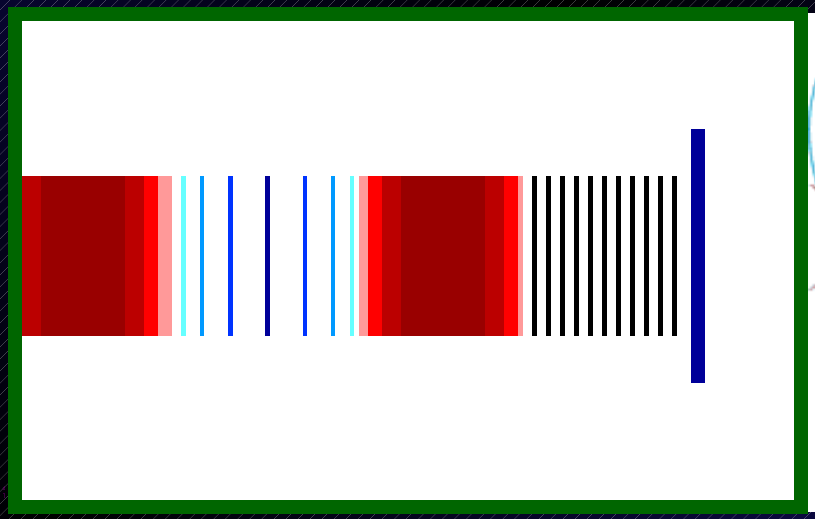
A produção do som

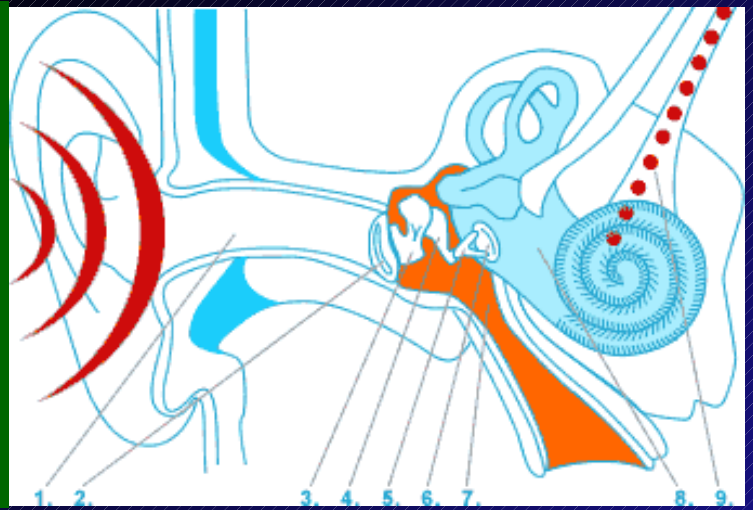
- Gradiente de pressão + captura da onda sonora pelo ouvido externo + oscilação do tímpano + impulsos nervosos decodificados no cérebro $\Rightarrow$ SOM!
- Como quantificar a produção do som a partir desta variação de pressão?
- E a diferença entre som e nota musical?

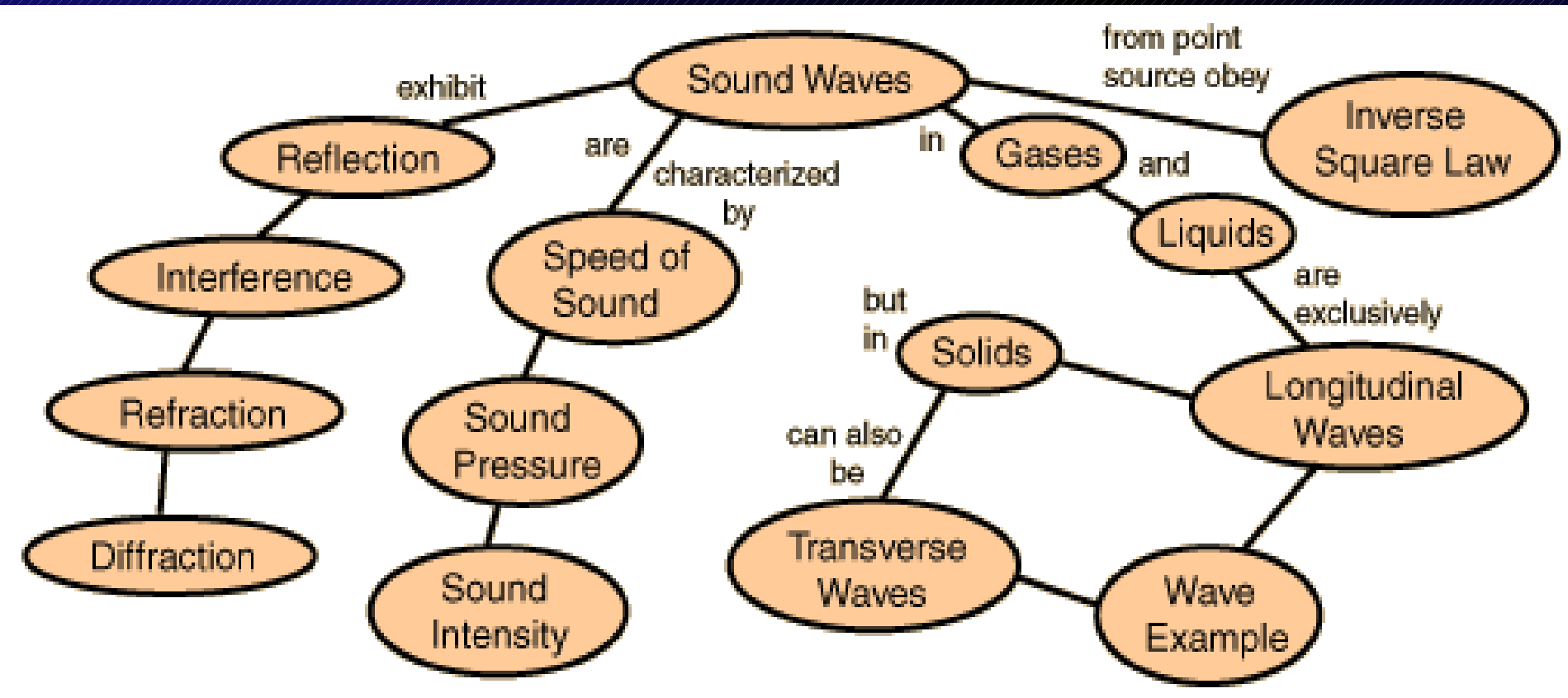


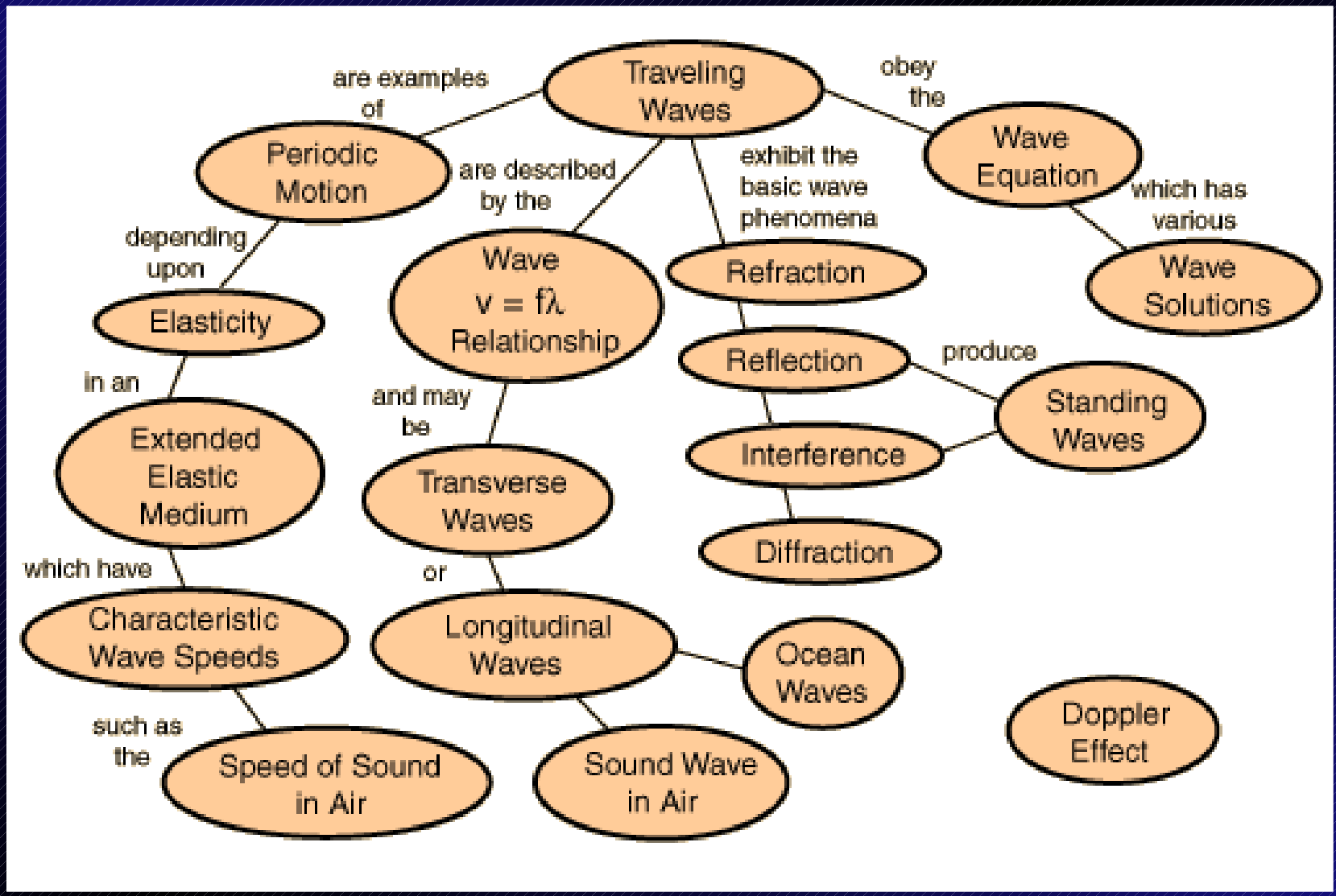
A produção do som





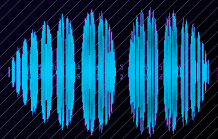


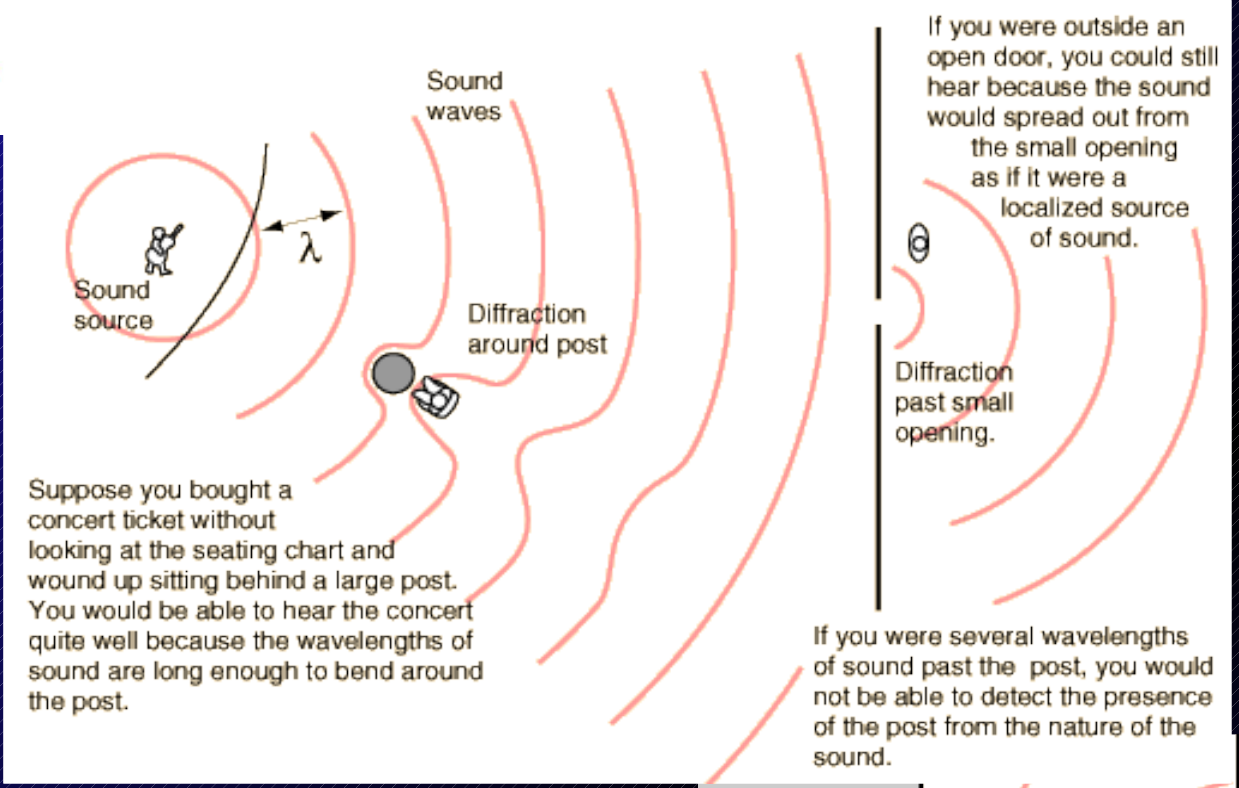

Sound Waves
exhibit
Reflection
Interference
Refraction
Diffraction
are characterized by
Speed of Sound
Sound Pressure
Sound Intensity
from point source obey
Inverse Square Law
in
Gases
and
Liquids
are exclusively
Longitudinal Waves
but in
Solids
can also be
Transverse Waves
Wave Example

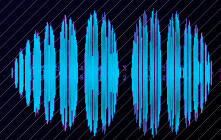

Traveling Waves
are examples of
Periodic Motion
depending upon
Elasticity
in an
Extended Elastic Medium
which have
Characteristic Wave Speeds
such as the
Speed of Sound in Air
are described by the
Wave v = fλ Relationship
and may be
Transverse Waves
or
Longitudinal Waves
Sound Wave in Air
obey the
Wave Equation
which has various
Wave Solutions
exhibit the basic wave phenomena
Refraction
Reflection
Interference
Diffraction
produce
Standing Waves
Ocean Waves
Doppler Effect

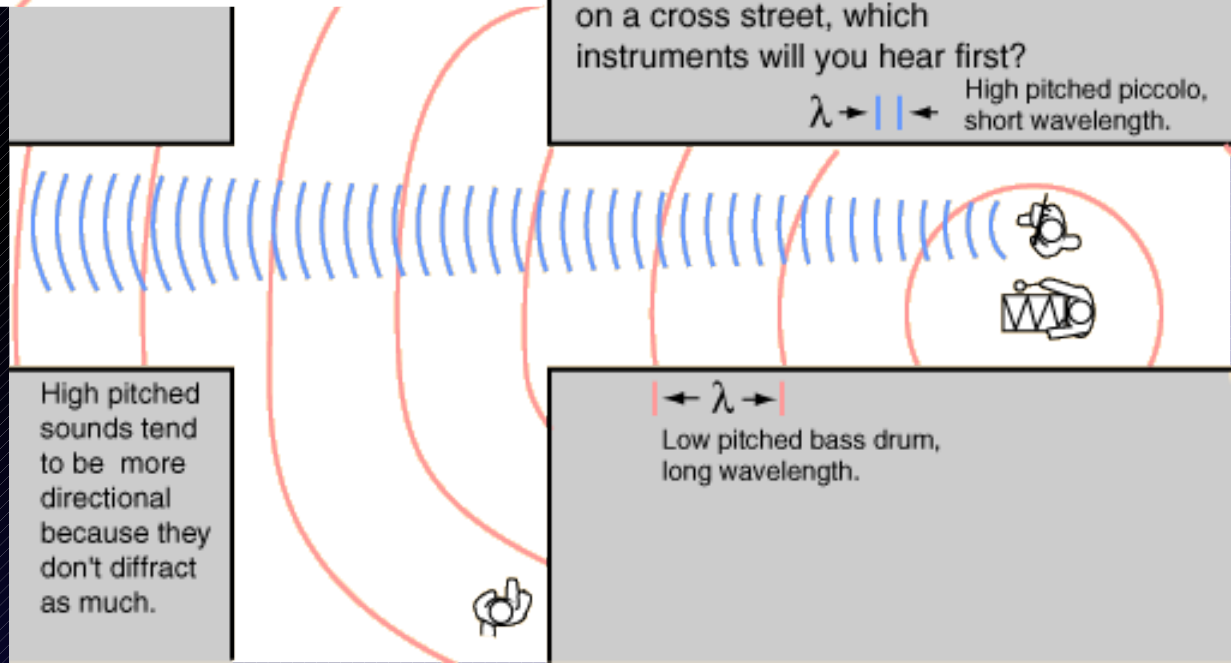
Propriedades físicas do som

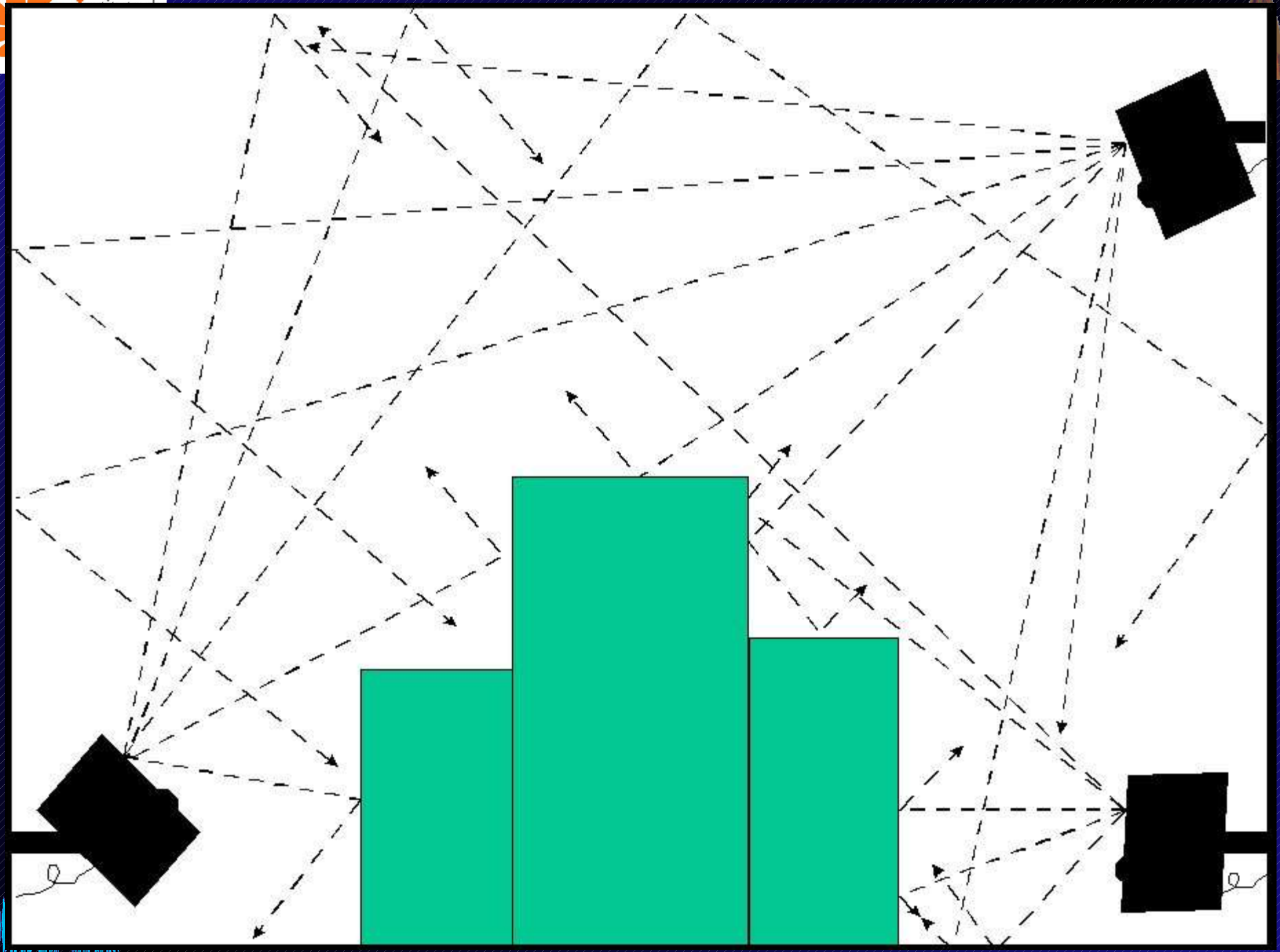
- Os principais efeitos com os quais os engenheiros de som e músicos tem que lidar são:
  - Difração
  - Reflexão
  - Interferência
  - Refração
  - Efeitos de transmissão, absorção e dispersão das ondas.

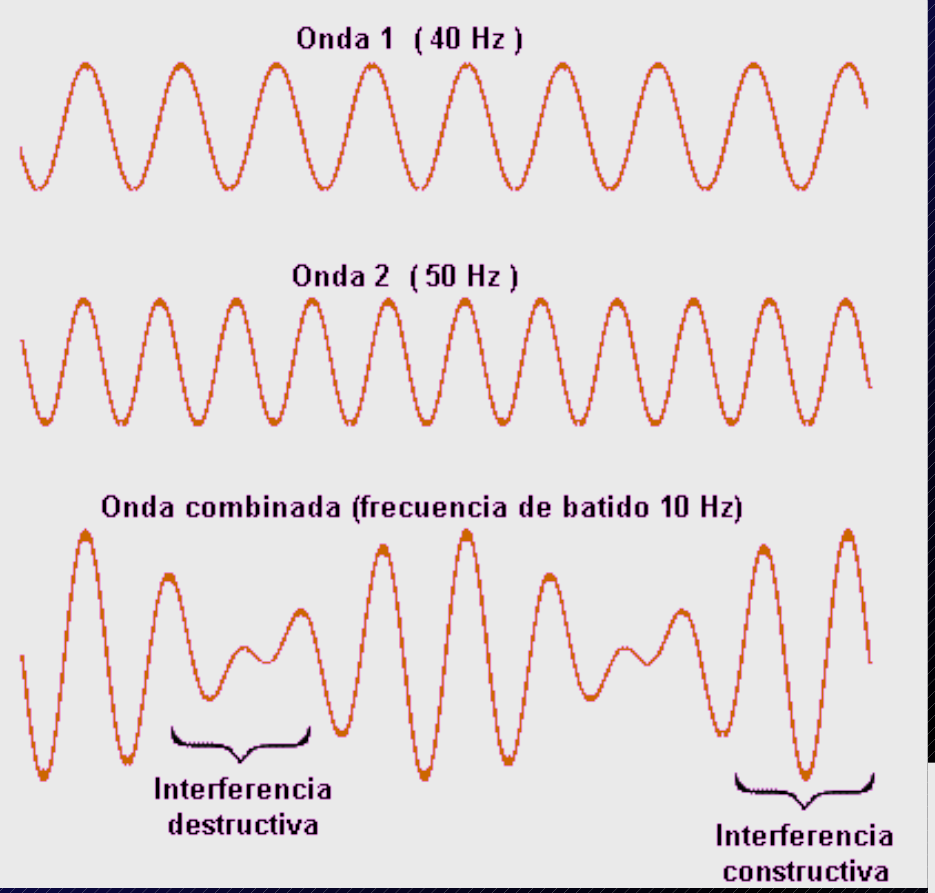


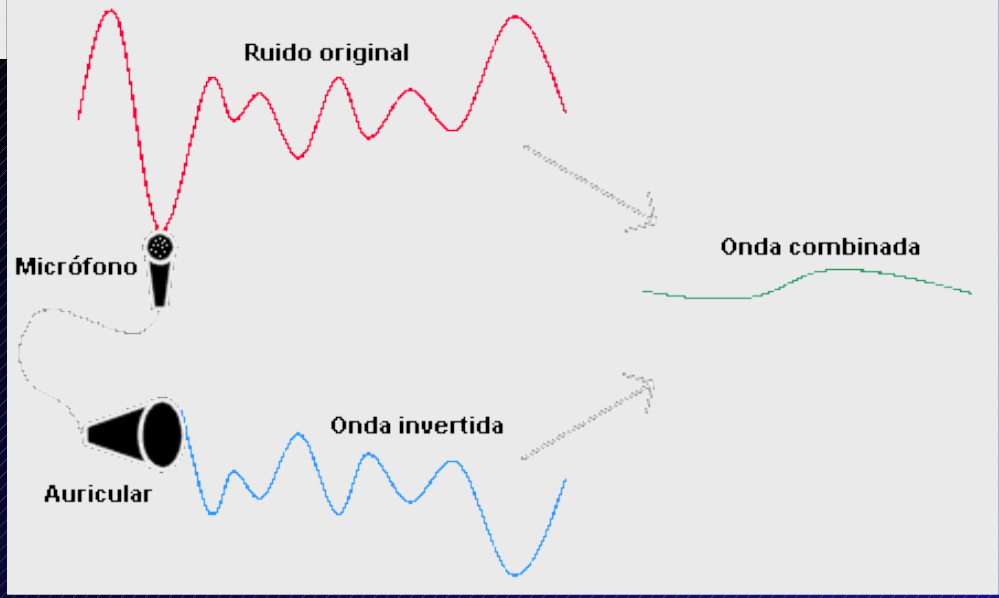

Sound waves
λ
Sound source
Diffraction around post
If you were outside an open door, you could still hear because the sound would spread out from the small opening as if it were a localized source of sound.
Diffraction past small opening.
Suppose you bought a concert ticket without looking at the seating chart and wound up sitting behind a large post. You would be able to hear the concert quite well because the wavelengths of sound are long enough to bend around the post.
If you were several wavelengths of sound past the post, you would not be able to detect the presence of the post from the nature of the sound.

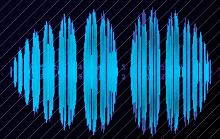



If a marching band is approaching on a cross street, which instruments will you hear first?
λ
High pitched piccolo, short wavelength.
High pitched sounds tend to be more directional because they don't diffract as much.
λ
Low pitched bass drum, long wavelength.



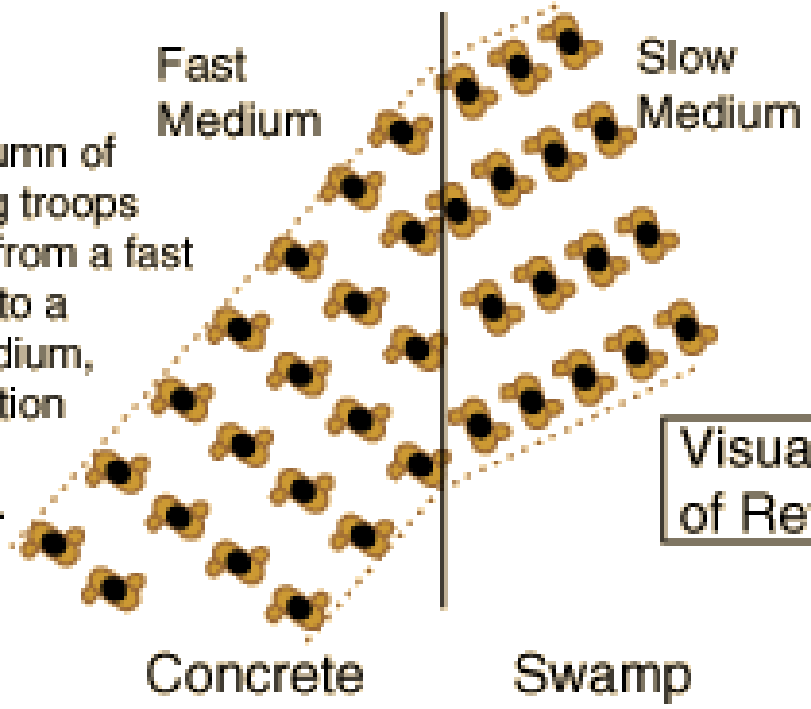

Onda 1 (40 Hz)
Onda 2 (50 Hz)
Onda combinada (frecuencia de batido 10 Hz)
Interferencia destructiva
Interferencia constructiva


Ruido original
Micrófono
Onda combinada
Onda invertida
Auricular

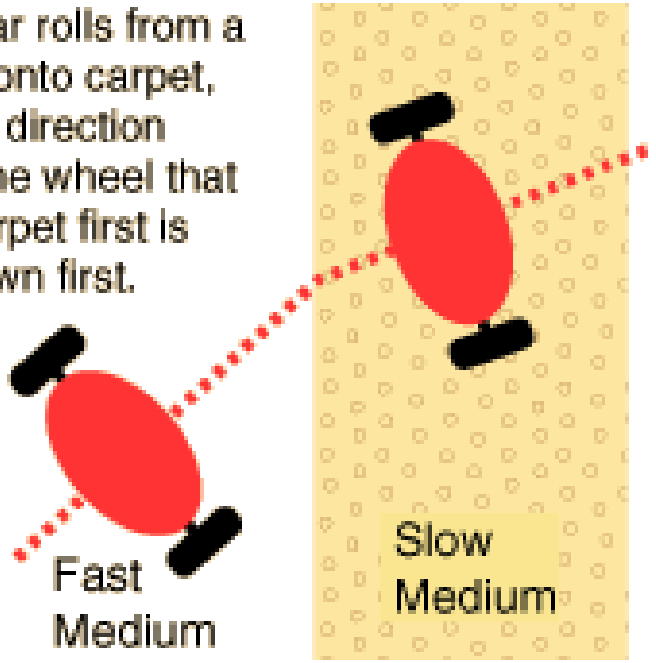


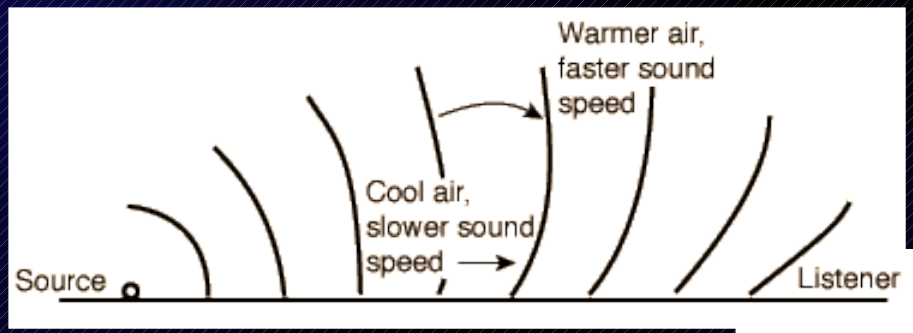
Visualizations of Refraction

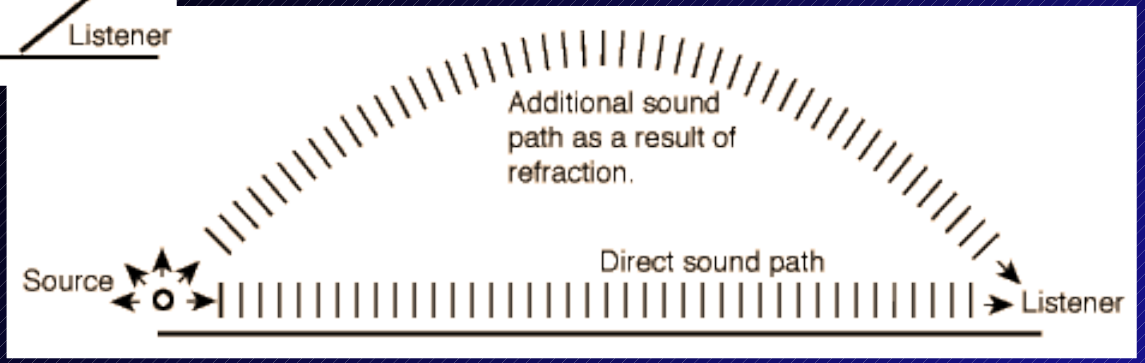
As a column of marching troops crosses from a fast medium to a slow medium, the direction of march changes.



As a toy car rolls from a hard floor onto carpet, it changes direction because the wheel that hits the carpet first is slowed down first.





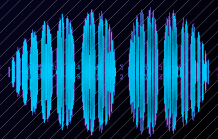


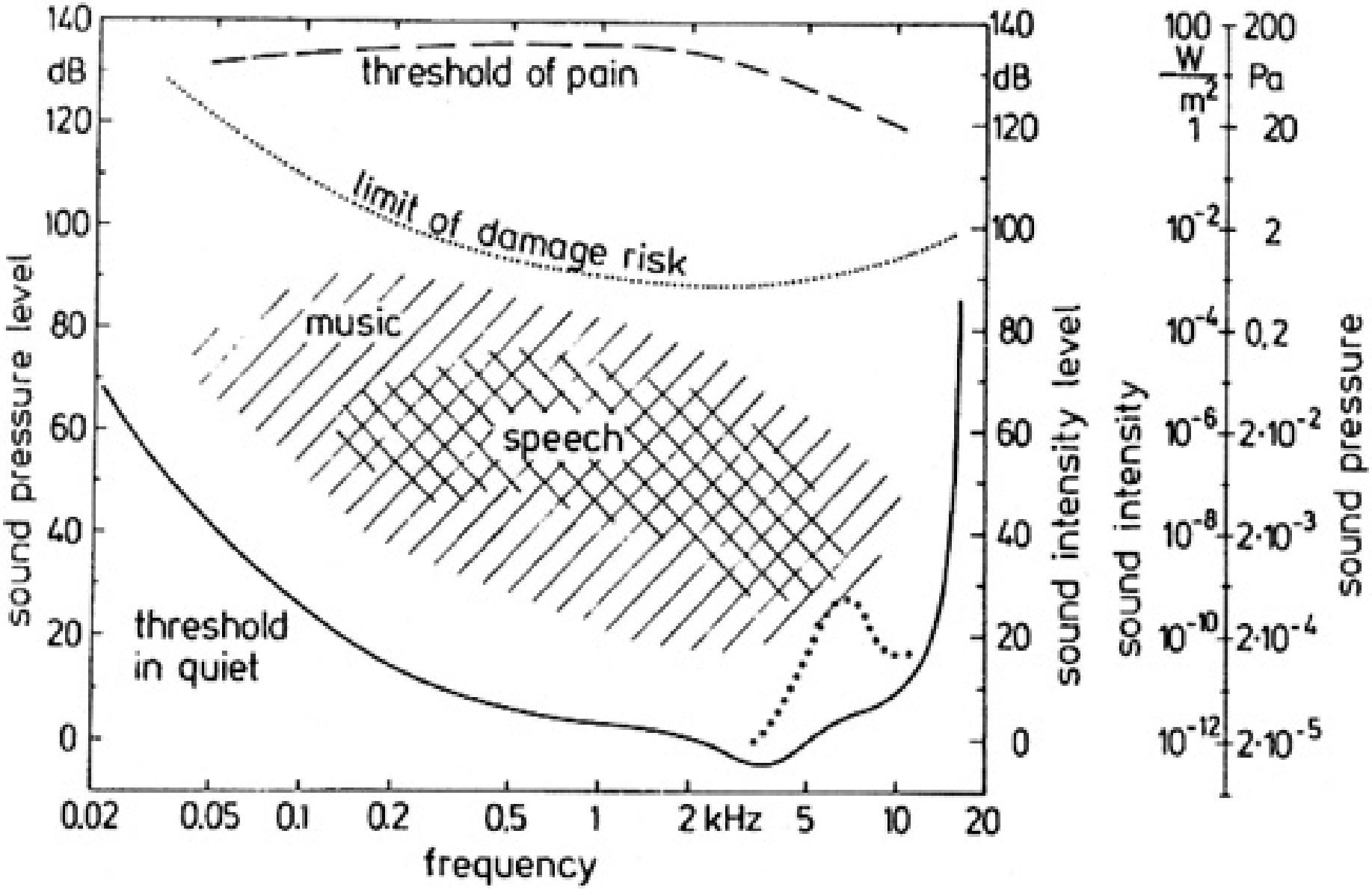
A percepção sonora...

- Intervalo perceptível pelo ouvido humano:

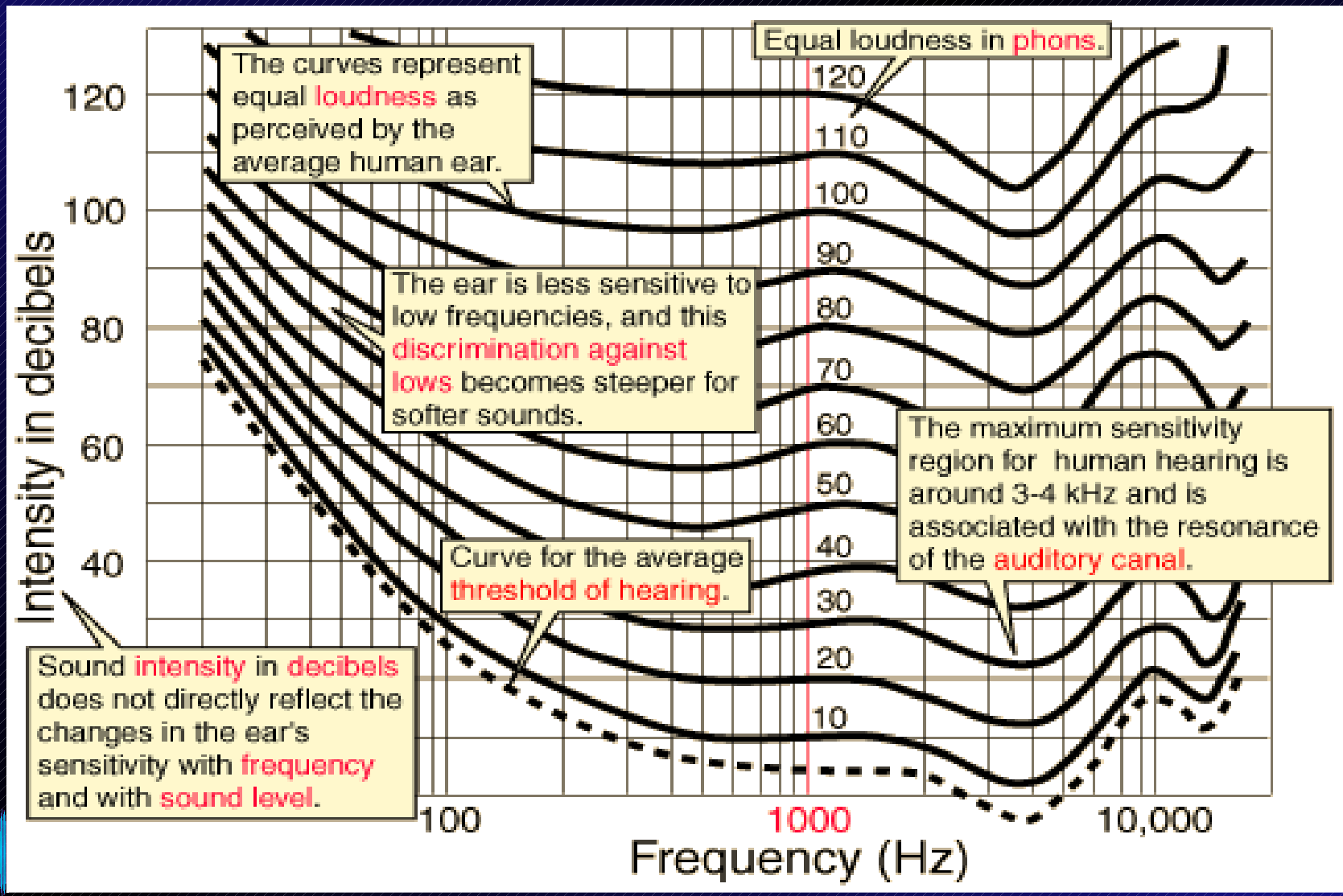
$$20 \leq f \leq 20\ kHz$$

- Baixo: 80 e 300 Hz
- Soprano: 300 e 1100 Hz
- Instrumentos musicais: intervalo muito maior



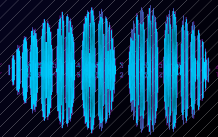

threshold of pain
limit of damage risk
music
speech
threshold in quiet
sound pressure level
sound intensity level
sound intensity
sound pressure
dB
W/m²
Pa
frequency
0.02
0.05
0.1
0.2
0.5
1
2 kHz
5
10
20
140
120
100
80
60
40
20
0
200
2
0,2
10^{-2}
10^{-4}
10^{-6}
10^{-8}
10^{-10}
10^{-12}
$2\cdot10^{-2}$
$2\cdot10^{-3}$
$2\cdot10^{-4}$
$2\cdot10^{-5}$

Altura perceptível pelo ouvido humano



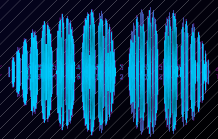
Descrevendo cientificamente o som...

- Forma matemática básica: uma sucessão de curvas, conhecida como senóide...
- O que considerar na senóide? A altura dos picos, de quanto em quanto tempo eles se repetem e qual é o seu comprimento até que comecem a se repetir.



Descrevendo cientificamente o som...

- Sons: combinação de diversas senóides ao mesmo tempo (SUPERPOSIÇÃO).
- Sons musicais: combinação "harmônica" de diversas senóides, com relação bem definida entre seus argumentos
- Analogia do movimento das ondas sonoras: mola de brinquedo



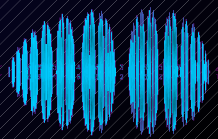
Instituto de Projetos e Estudos em Educação

Harmônicos

- Representação genérica da soma das diversas freqüências individuais de uma onda sonora:

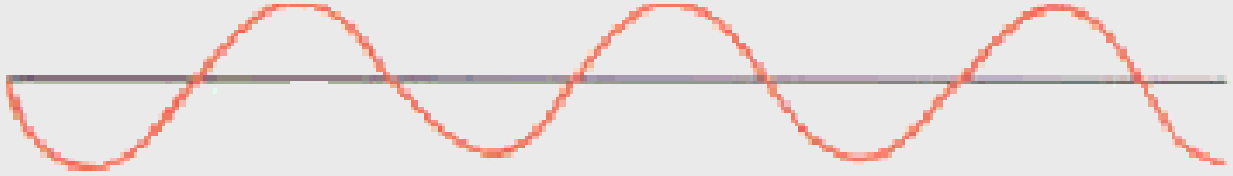
$$SOM = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + C_6 + \ldots,$$

- Cada termo C_i corresponde a uma determinada freqüência, múltipla da freqüência do termo C_1. Chamamos essa série de "série harmônica".
- Decomposição harmônica do Lá fundamental ($Lá_4$), de 440 Hz:
  - Primeiro harmônico (Fundamental): 440 Hz.
  - Segundo harmônico (primeiro sobretom): 880 Hz
  - Terceiro harmônico(segundo sobretom): 1760 Hz

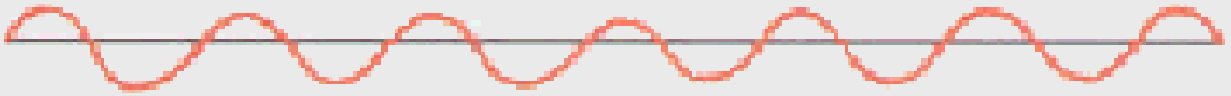


Análise de Fourier

Fundamental

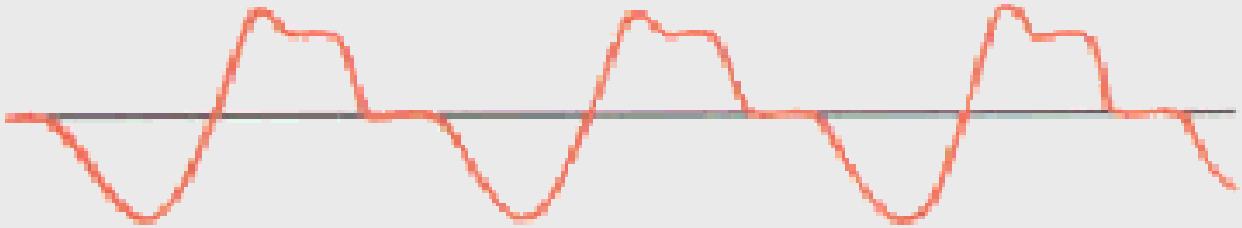


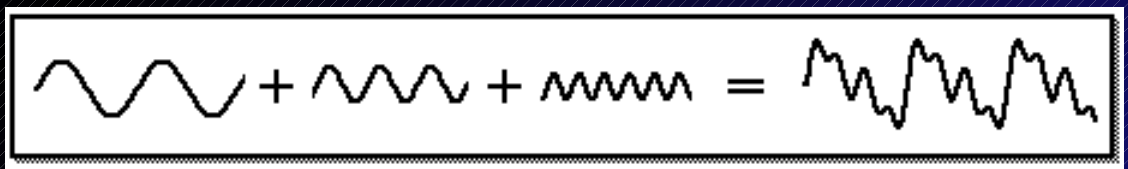
Segundo Harmônico

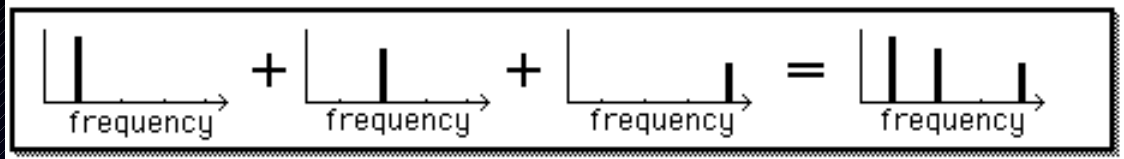


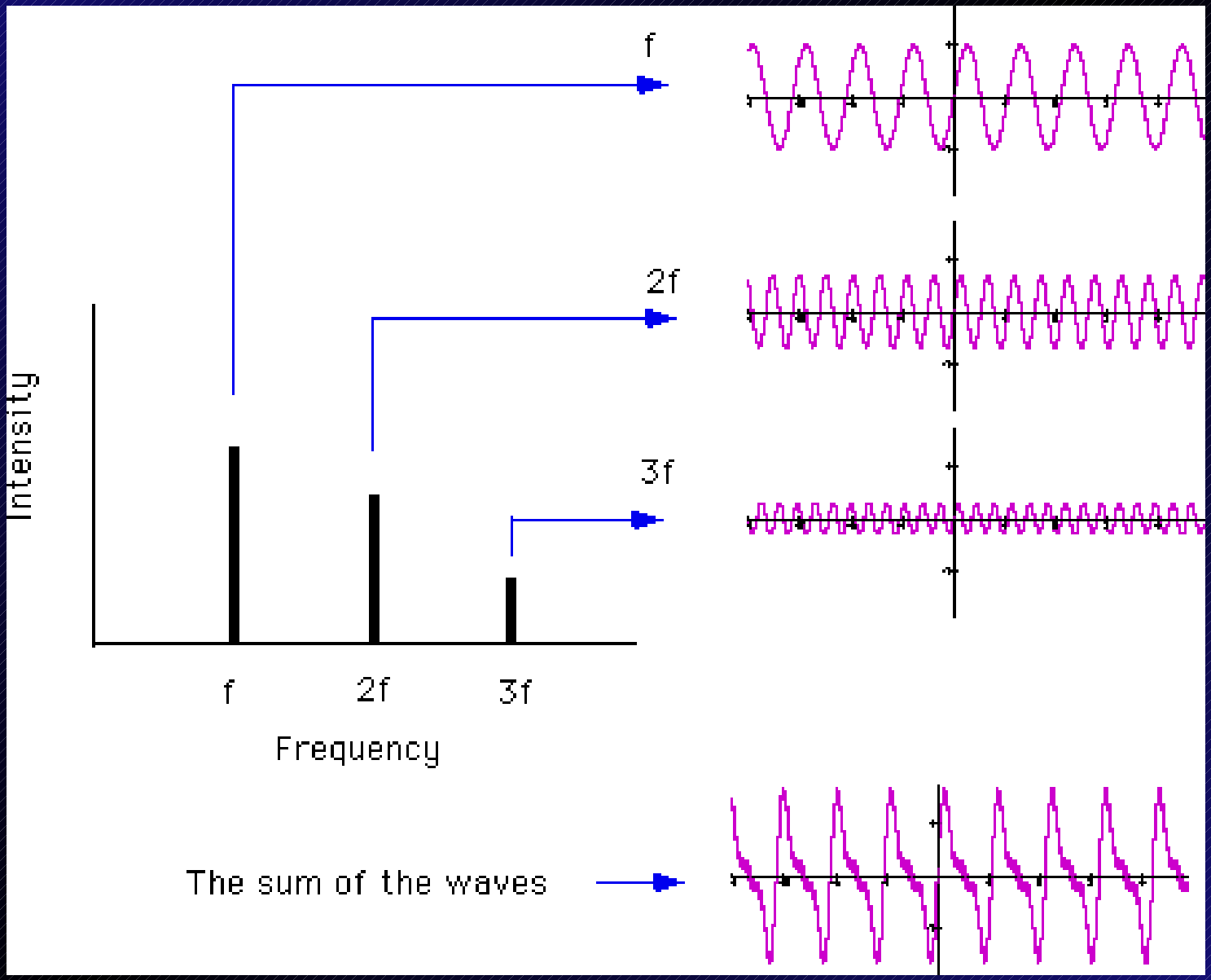
Terceiro Harmônico

Onda Composta

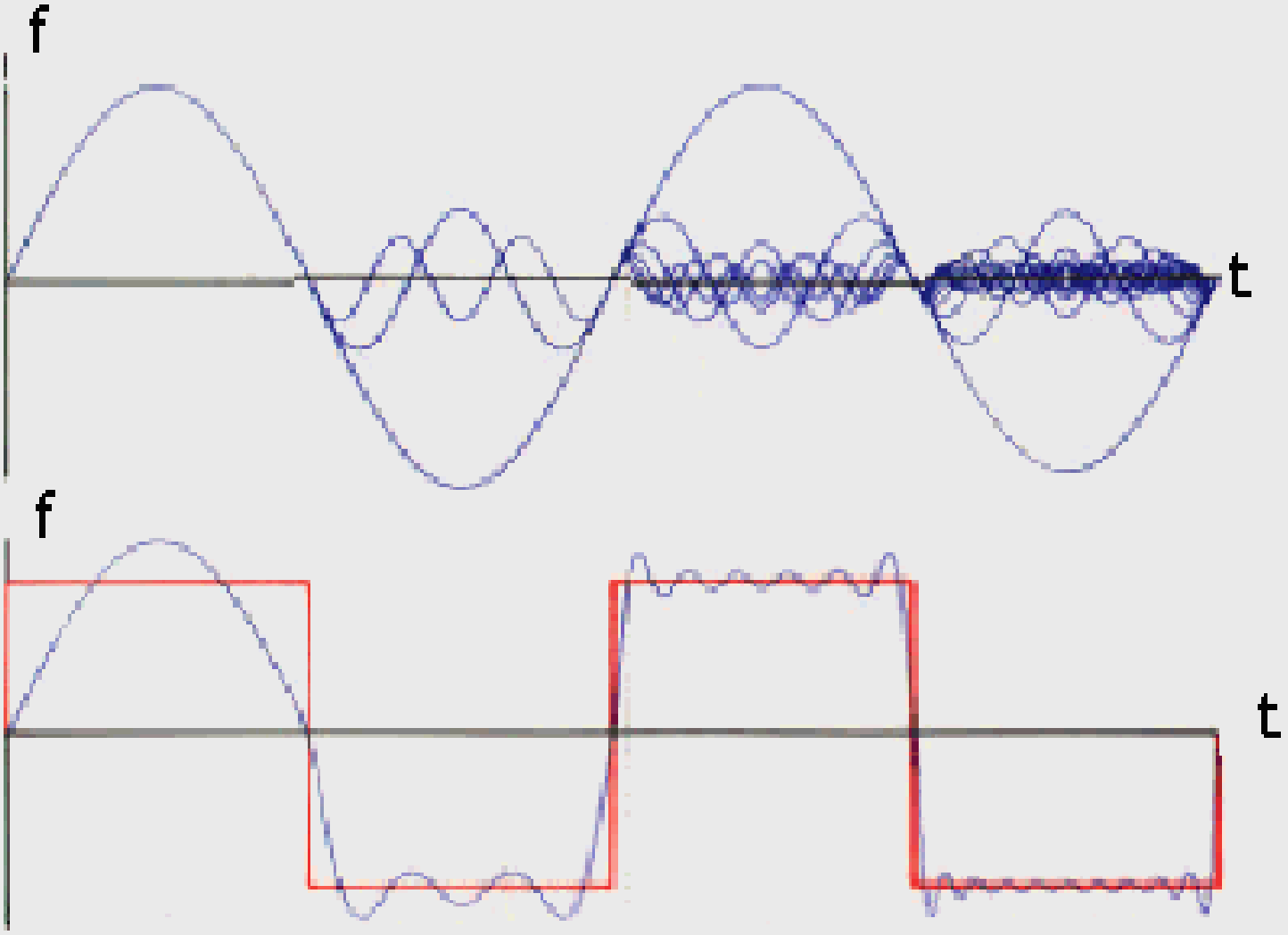






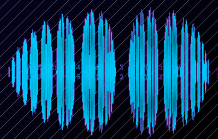

f
2f
3f
Intensity
f
2f
3f
Frequency
The sum of the waves

Séries de Fourier



Criando uma nota musical

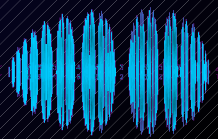
- A música ocidental caracteriza-se por um conjunto definido de freqüências (que são representados pelas doze notas musicais, em diferentes alturas).
- Instrumentos musicais devem ser capazes de produzir essas freqüências e amortecer as outras, que estão contidas no intervalo em que o ouvido humano é sensível.
- Sistemas vibrantes ressonantes são excitados por algumas destas freqüências, que correspondem às freqüências de ressonância do sistema.



Instituto de Projetos e Estudos em Educação

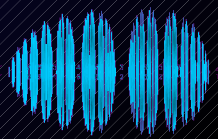
Algumas definições

- Intervalo: relação entre as freqüências de duas notas musicais.
- Nota musical: som cuja freqüência de vibração encontra-se dentro do intervalo perceptível pelo ouvido humano.
- Altura: percepção relacionada à frequência de emissão de uma determinada nota musical.
- Música: combinação, sob as mais diversas formas, de uma seqüência de notas musicais em diferentes intervalos, tanto de altura quanto de tempo.

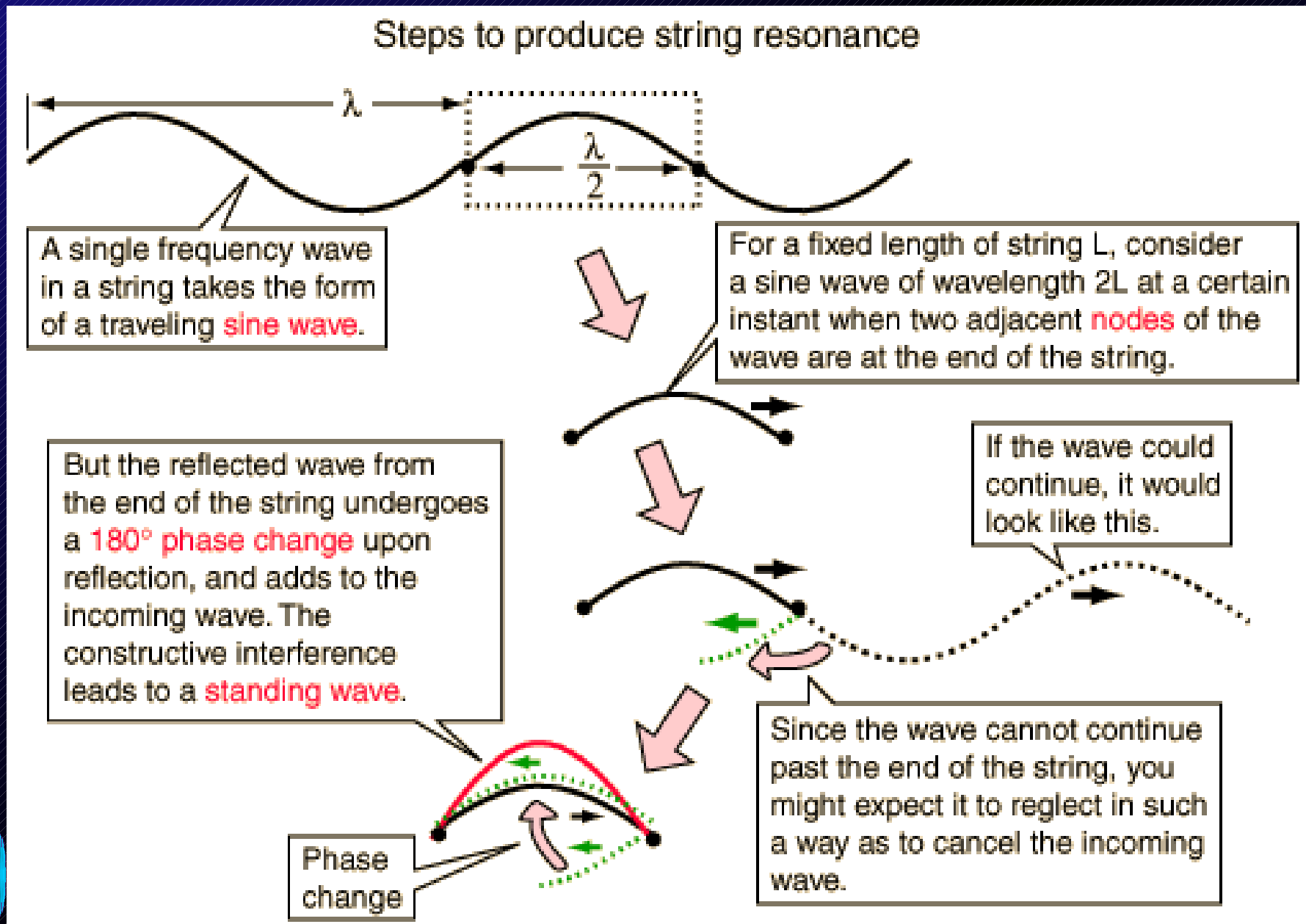


Criando uma nota musical

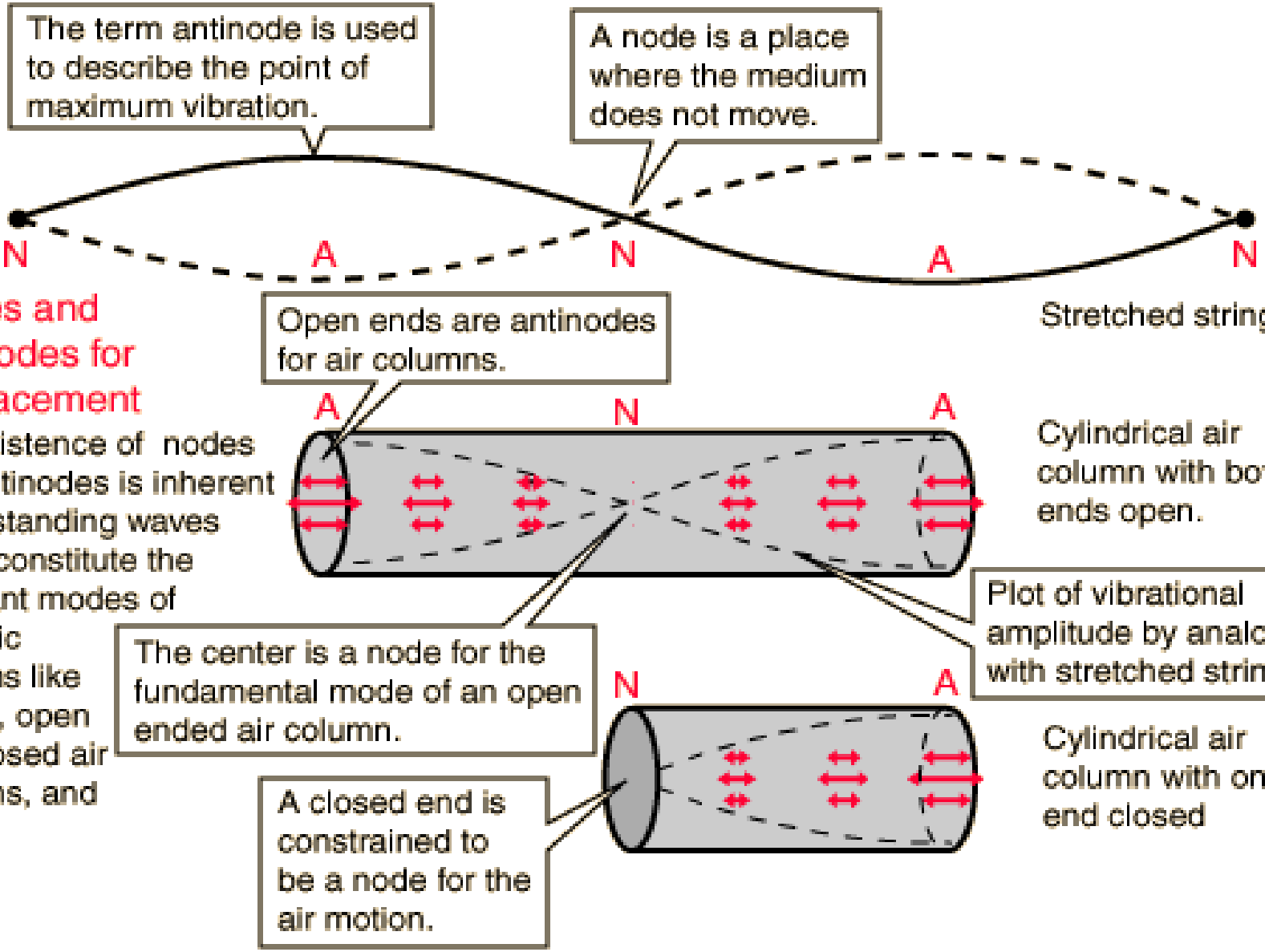
- A produção do som está associada à transferência de energia por um elemento excitador (por exemplo o arco de um violino) para o veículo produtor do som, seguida da colocação do ar em movimento e da sustentação da intensidade em níveis aceitáveis para que o som possa ser aproveitado em termos musicais.
- A seqüência de transferência pode ser imaginada da seguinte forma: um vibrador primário, unidimensional (a corda), é excitado, transfere a energia para um vibrador secundário, bidimensional (o tampo), que excita a massa de ar no interior da caixa acústica do instrumento.



Ressonância

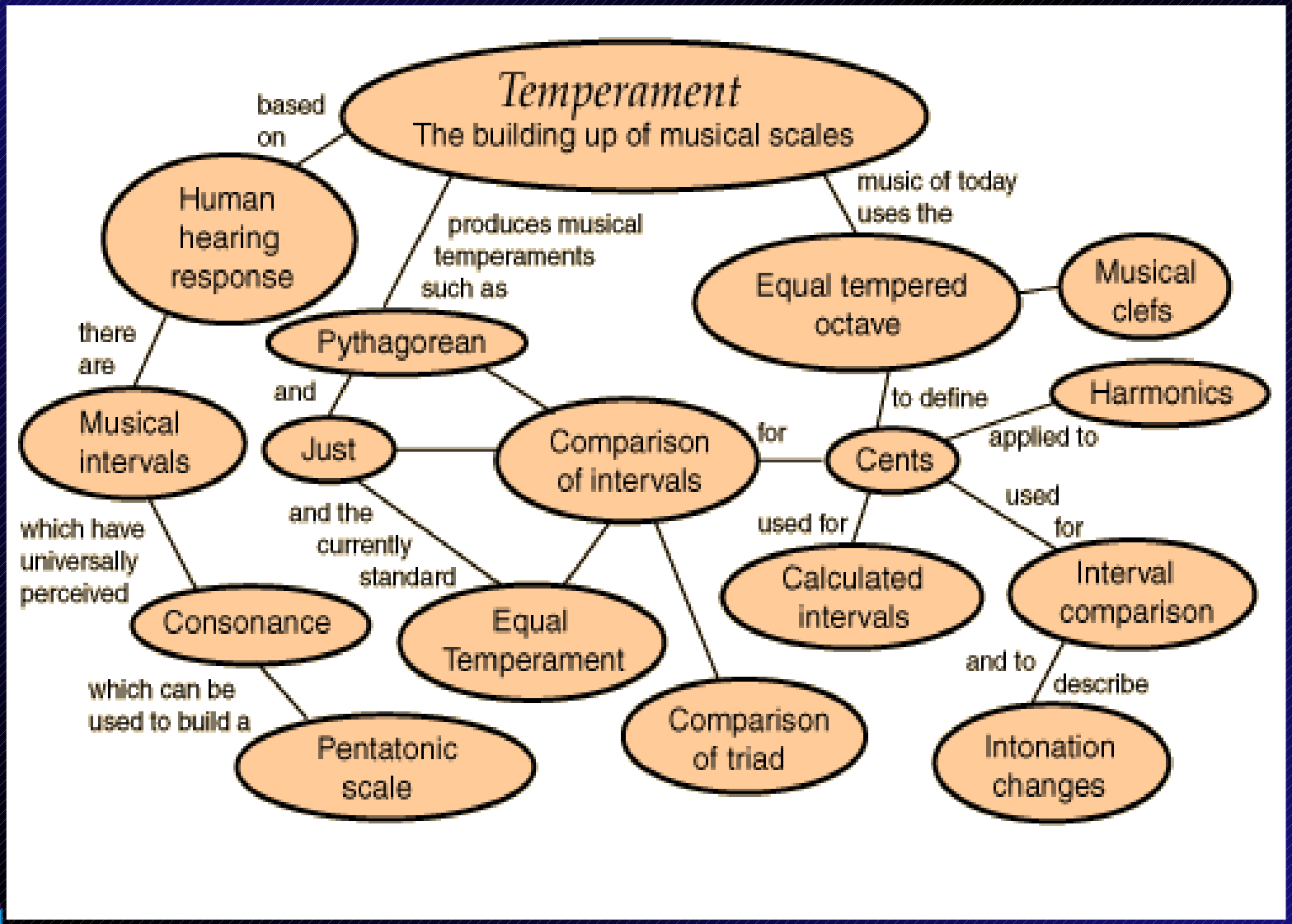


Ondas estacionárias



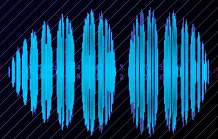
Instituto de Projetos e Estudos em Educação

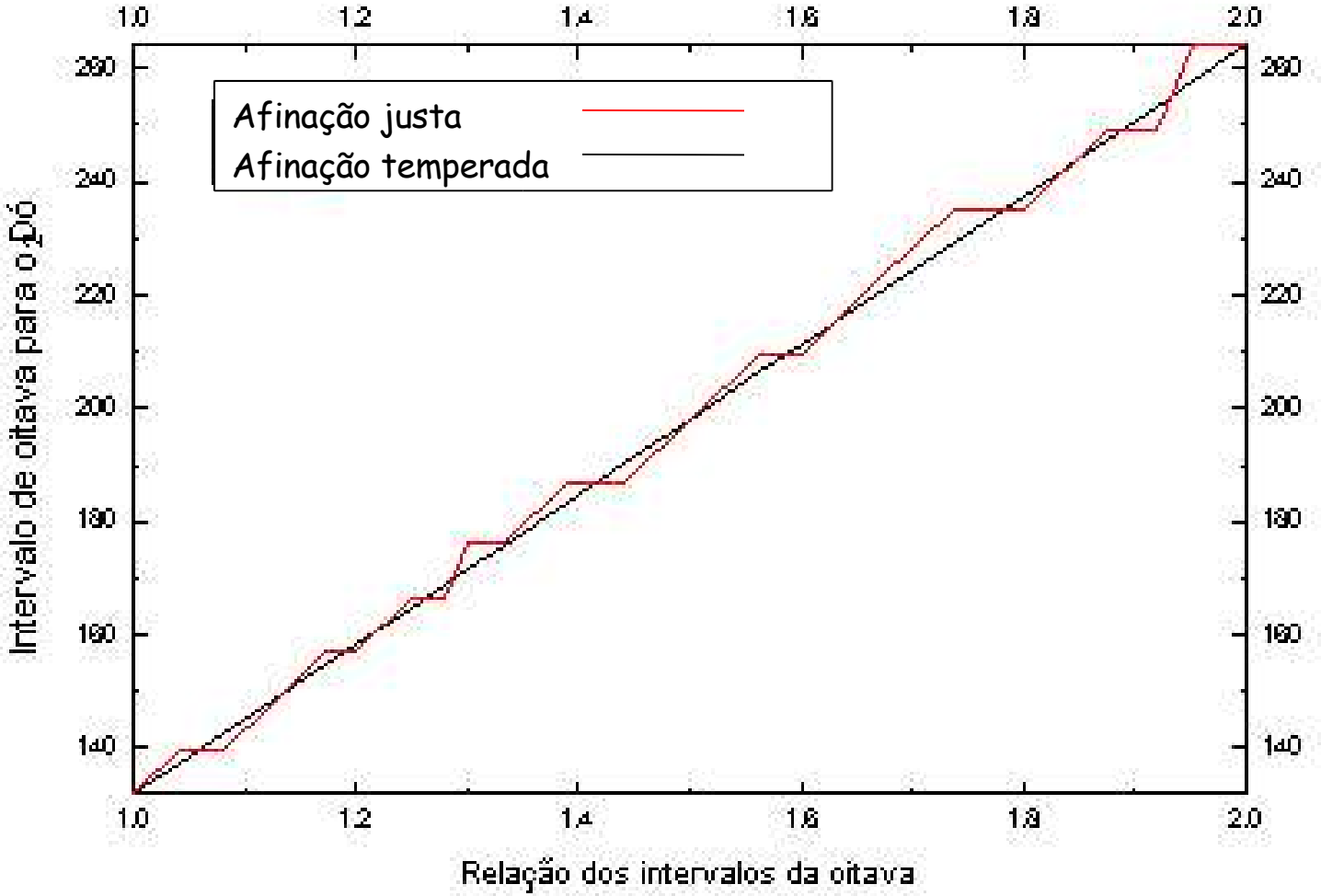
Escalas



Instituto de Projetos e Estudos em Educação

Nota	Intervalo com a nota básica	Afinação natural	Freq (Hz)	Afinação temperada	Freq (Hz)
Dó	Uníssono	1=1,000	132,000	1,000	132,000
Dó #	Semitom	25/24=1,042	137,544	1,059	139,788
Ré $_b$	Segunda diminuta	27/25=1,080	142,560	1,059	139,788
Ré	Segunda maior	9/8=1,125	148,500	1,122	148,104
Ré #	Segunda aumentada	76/64=1,172	154,704	1,189	156,948
Mi $_b$	Terça menor	6/5=1,200	158,400	1,189	156,948
Mi	Terça maior	5/4=1,250	165,000	1,260	166,320
Fá $_b$	Quarta diminuta	32/25=1,280	168,96	1,260	166,320
Mi #	Terça aumentada	125/96=1,302	171,864	1,335	176,220
Fá	Quarta perfeita	4/3=1,333	175,956	1,335	176,220
Fá #	Quarta aumentada	25/18=1,389	183,348	1,414	186,648
Sol $_b$	Quinta diminuta	36/25=1,440	190,080	1,414	186,648
Sol	Quinta perfeita	3/2=1,500	198,000	1,498	197,736
Sol #	Quinta aumentada	25/16=1,563	206,316	1,587	209,484
La $_b$	Sexta menor	8/5=1,600	211,200	1,587	209,484
Lá	Sexta maior	5/3=1,667	220,044	1,682	222,024
Lá #	Sexta aumentada	125/72=1,737	229,284	1,782	235,224
Si $_b$	Sétima menor	9/5=1,800	237,600	1,782	235,224
Si	Sétima maior	15/8=1,875	247,50	1,888	249,216
Dó $_b$	Oitava diminuta	48/25=1,920	253,440	1,888	249,216
Si #	Sétima aumentada	125/64=1,953	257,796	2,000	264,000
Dó	Oitava perfeita	2=2,000	264,000	2,000	264,000




Afinação justa
Afinação temperada
Intervalo de oitava para o Dó
Relação dos intervalos da oitava
1.0
1.2
1.4
1.6
1.8
2.0
260
240
220
200
180
160
140

Escala Logarítmica para Medida de Intervalo de Frequências

Unidade=Oitava

Temos uma oitava sempre que o quociente de duas frequências for igual a 2. ->200/100; 400/200; 800/400 = 2.

Matematicamente a oitava é definida assim => $I_{1-2} = \log_2 \frac{F1}{F2}$

Se F1=440 Hz e F2=220 Hz - O intervalo em Oitava é:

$$I_{1-2} = \log_2 \frac{F1}{F2} \qquad I_{1-2} = \log_2 \frac{440}{220} \qquad I_{1-2} = \log_2 2^2 = 1$$

Conversão para a base 10

$$I = 3{,}32 \log_{10} \frac{F1}{F2}$$

Para o intervalo de 20 a 20.000 Hz temos

$$I = 3{,}32 \log_{10} \frac{20.000}{20} = 3{,}32 \log_{10} 1.000 = 3{,}32 \times 3 = 9{,}96$$

Portanto para o intervalo 20 a 20.000 Hz temos 10 oitavas

Para o Intervalo de 20 a 20.000 Hz o centro da faixa está em 640 Hz

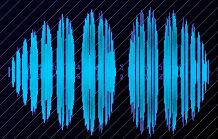
20 - 40 - 80 - 160 - 320 - 640 - 1280 - 2560 - 5120 - 10.240 - 20.480 Hz

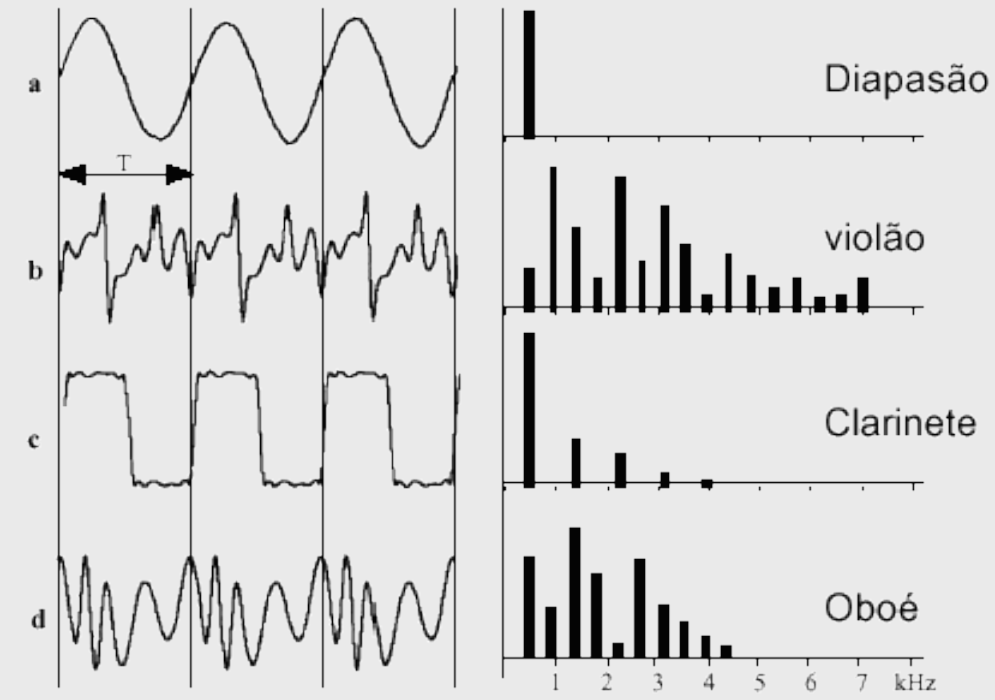
5 oitavas | 5 oitavas

L N

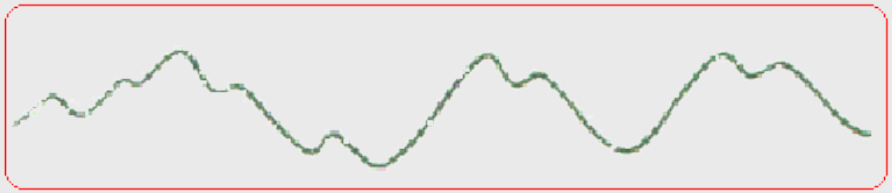
Ressonadores

- Cada instrumento musical possui uma "assinatura" - um conjunto de características sonoras a ele associado que permite uma descrição matematicamente precisa dos sons que este produz.
- Vimos que o som pode ser representado pela soma de diversas ondas individuais, conhecidas como componentes de Fourier.
- O resultado acústico da combinação de amplitudes, tempo de duração de cada um dos harmônicos presentes no som resultante, tipo do material de que é feito o instrumento e a forma de excitação do ar produz a forma sonora peculiar de cada instrumento, conhecida como **timbre.**

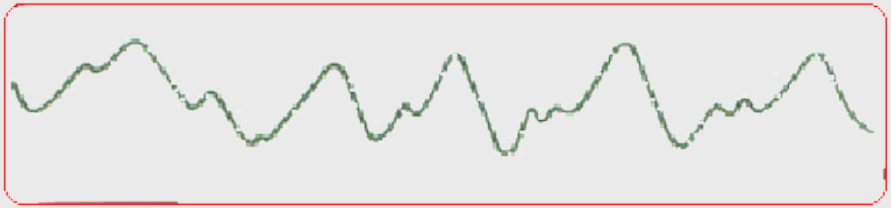




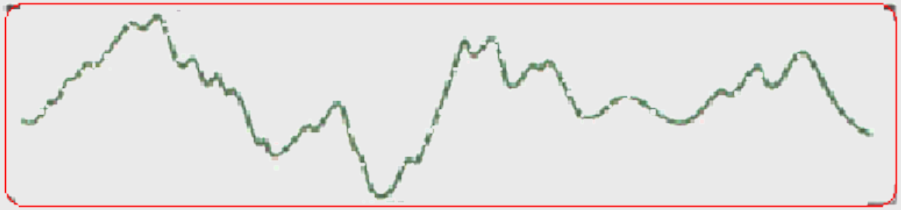
Timbre



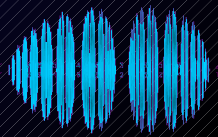
Oboé



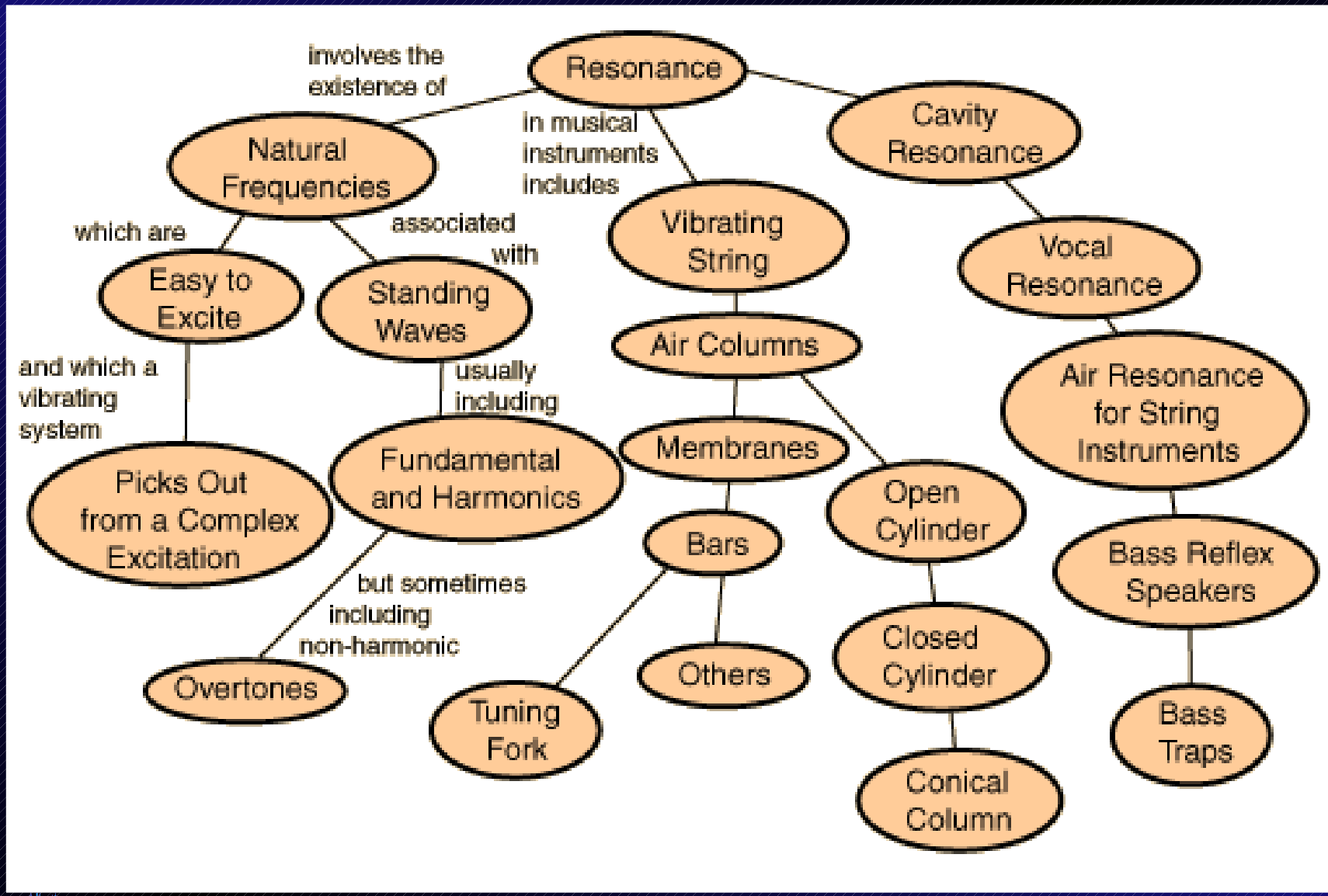
Clarinete

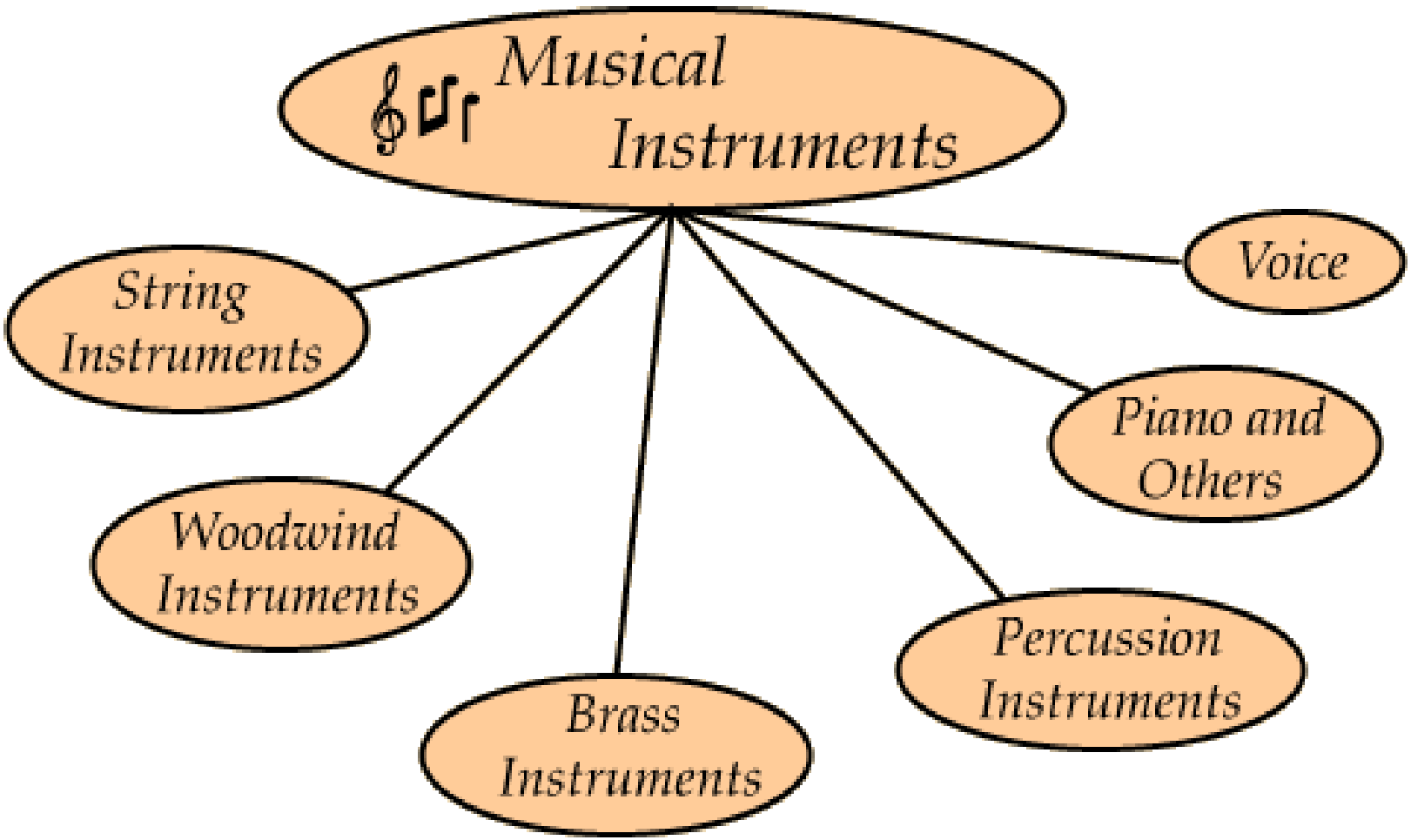


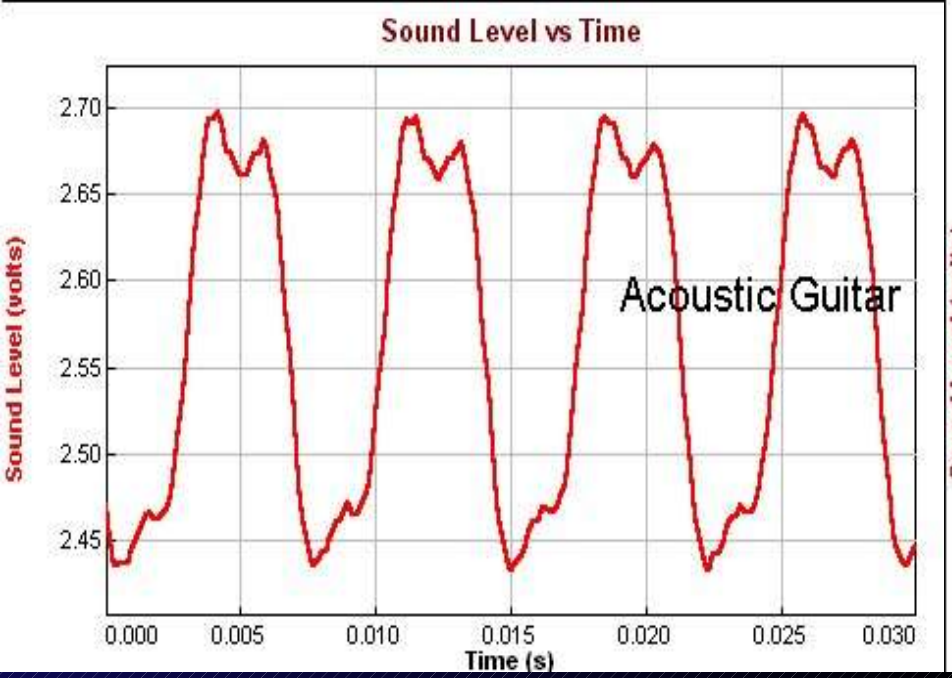
Oboé e clarinete juntos

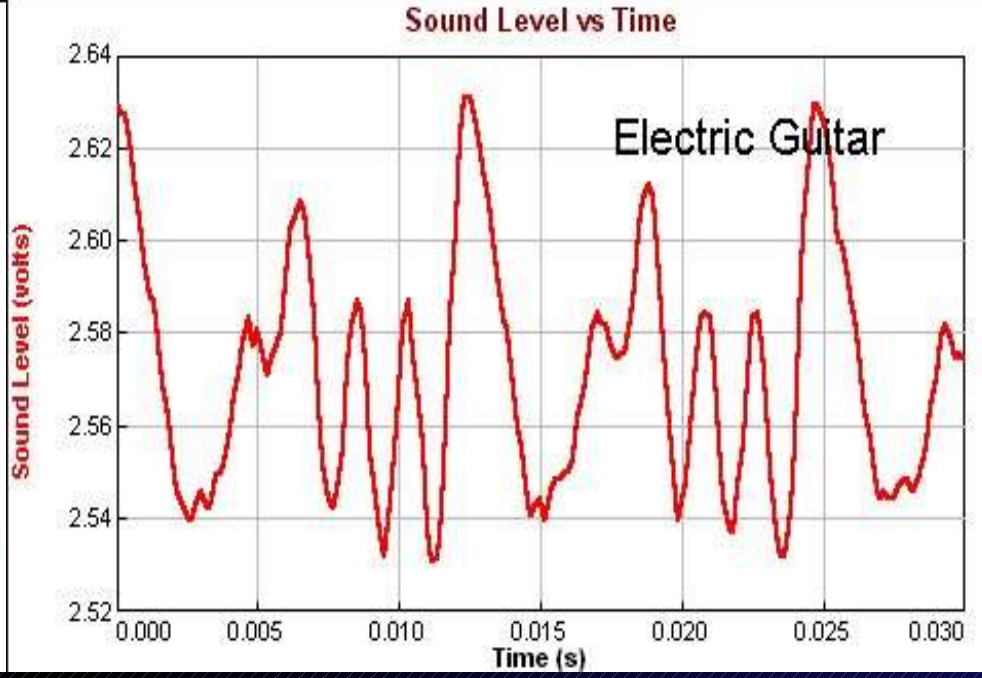


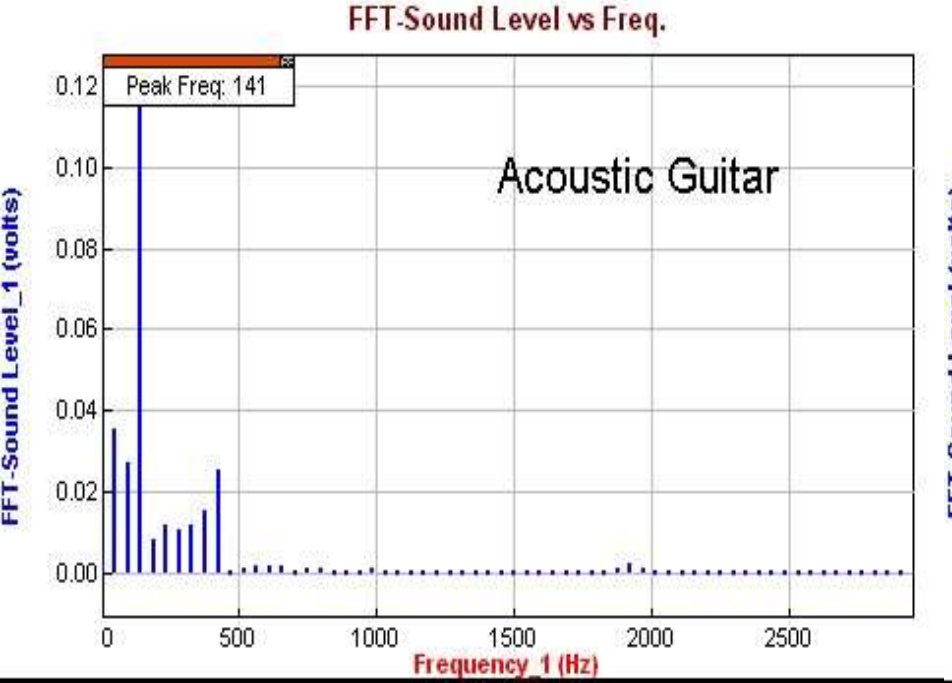
Ref: http://members.tripod.com/caraipora/repres_polar_esc_mus_temp.htm

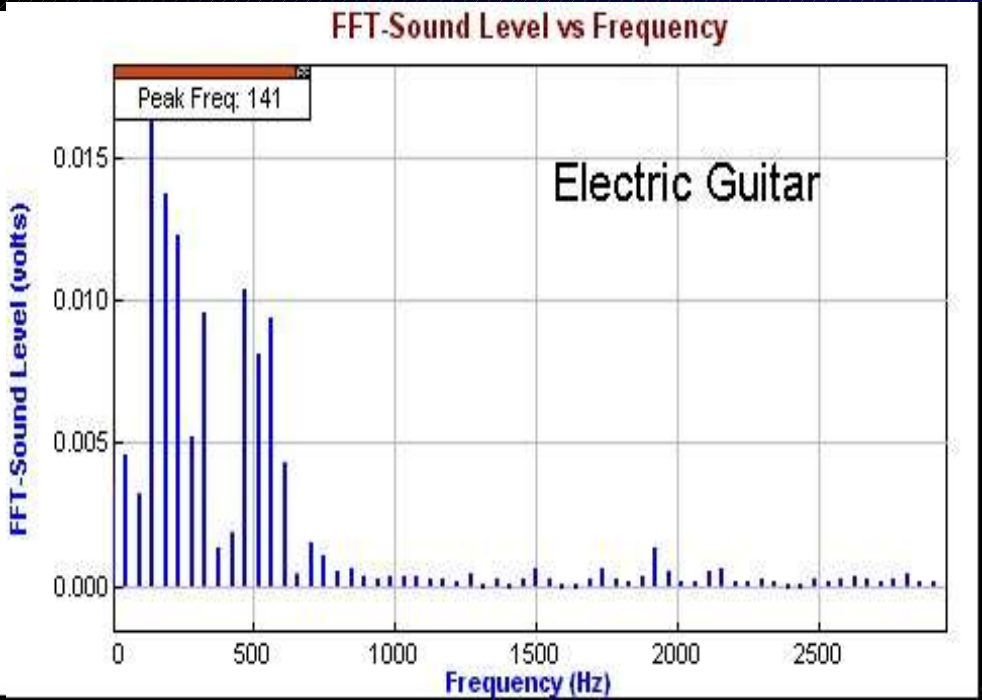

Resonance
involves the existence of
Natural Frequencies
which are
Easy to Excite
and which a vibrating system
Picks Out from a Complex Excitation
associated with
Standing Waves
usually including
Fundamental and Harmonics
but sometimes including non-harmonic
Overtones
in musical instruments includes
Vibrating String
Tuning Fork
Air Columns
Membranes
Bars
Others
Cavity Resonance
Vocal Resonance
Air Resonance for String Instruments
Bass Reflex Speakers
Bass Traps
Open Cylinder
Closed Cylinder
Conical Column

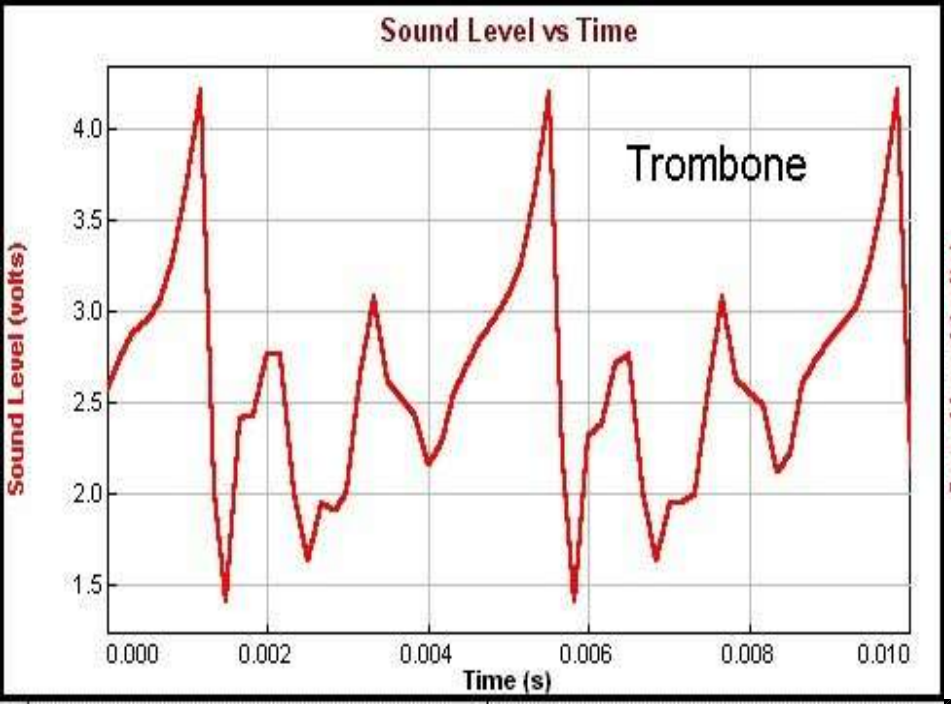

Musical Instruments
String Instruments
Woodwind Instruments
Brass Instruments
Percussion Instruments
Piano and Others
Voice

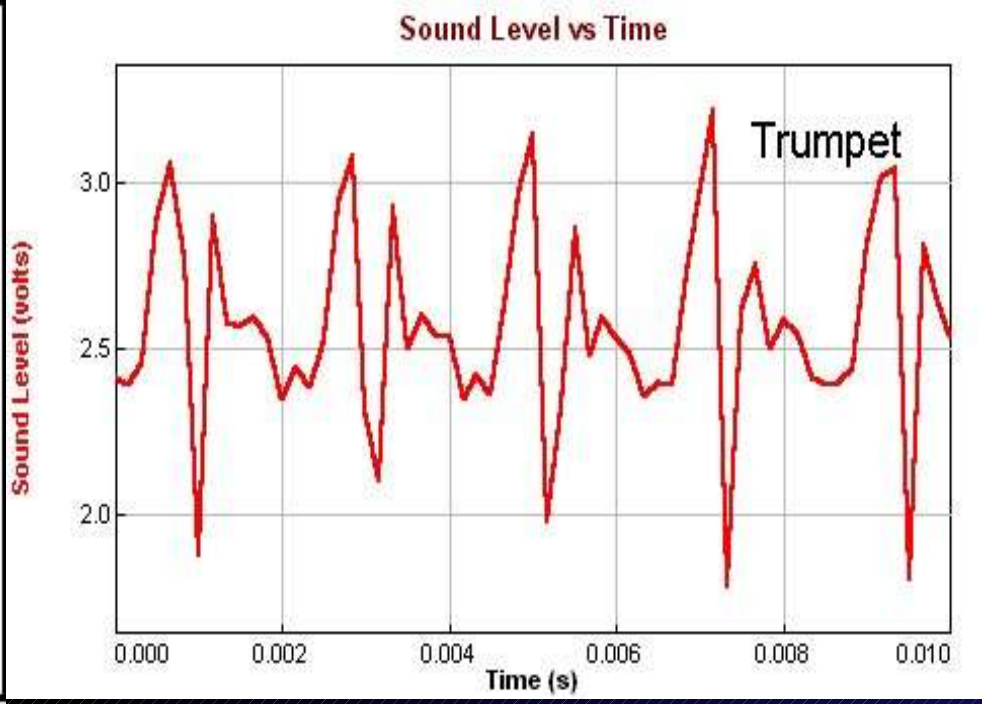

Sound Level vs Time
Acoustic Guitar
Sound Level (volts)
2.70
2.65
2.60
2.55
2.50
2.45
0.000
0.005
0.010
0.015
0.020
0.025
0.030
Time (s)

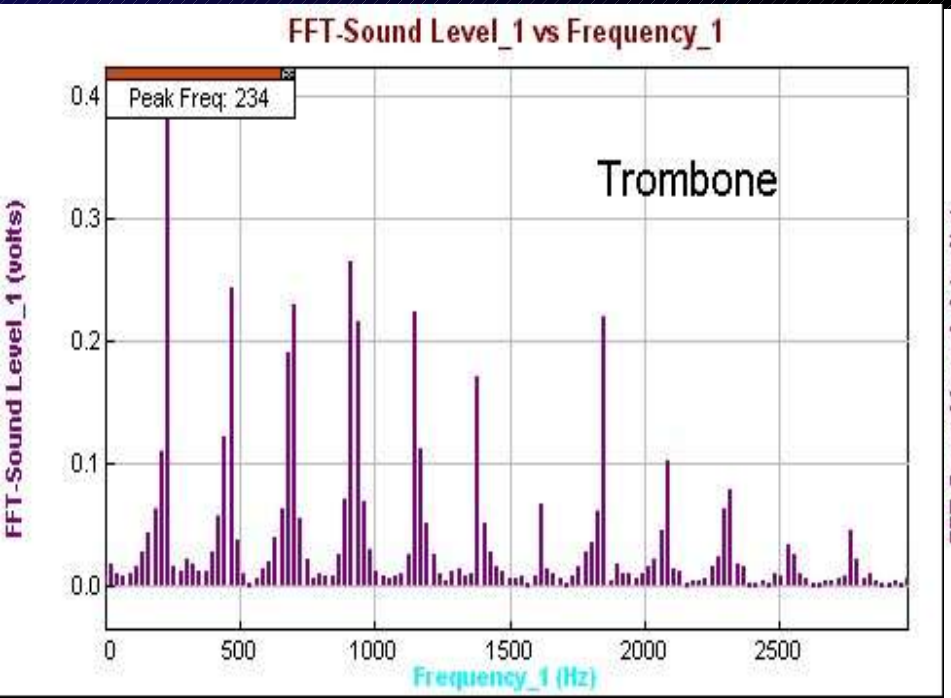

Sound Level vs Time
Electric Guitar
Sound Level (volts)
2.64
2.62
2.60
2.58
2.56
2.54
2.52
0.000
0.005
0.010
0.015
0.020
0.025
0.030
Time (s)

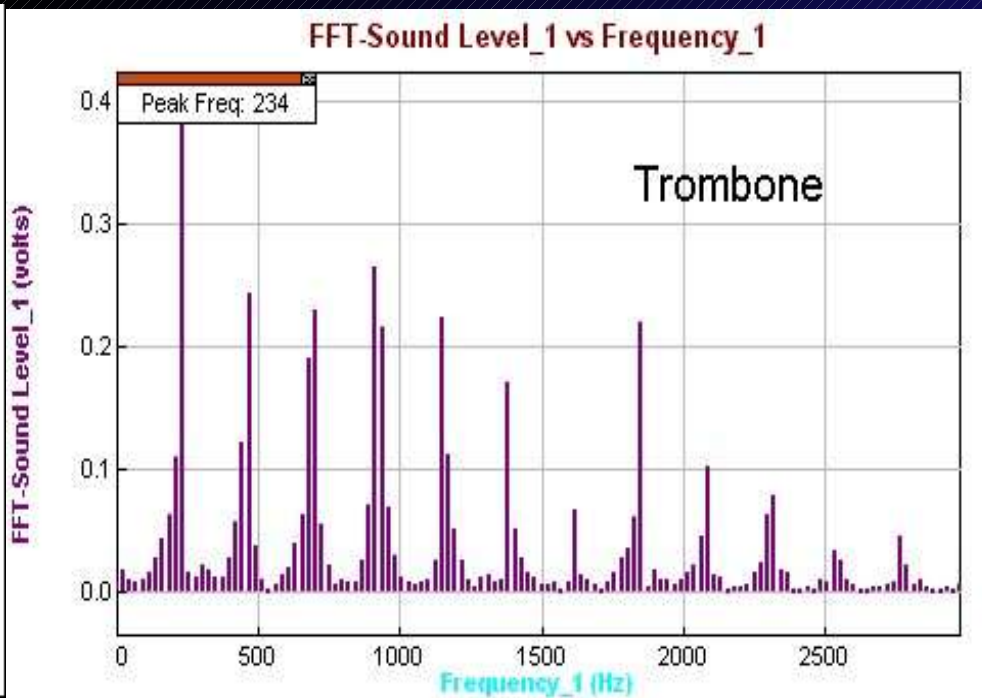

FFT-Sound Level vs Freq.
Peak Freq: 141
Acoustic Guitar
FFT-Sound Level_1 (volts)
0.12
0.10
0.08
0.06
0.04
0.02
0.00
0
500
1000
1500
2000
2500
Frequency_1 (Hz)


FFT-Sound Level vs Frequency
Peak Freq: 141
Electric Guitar
FFT-Sound Level (volts)
0.015
0.010
0.005
0.000
0
500
1000
1500
2000
2500
Frequency (Hz)

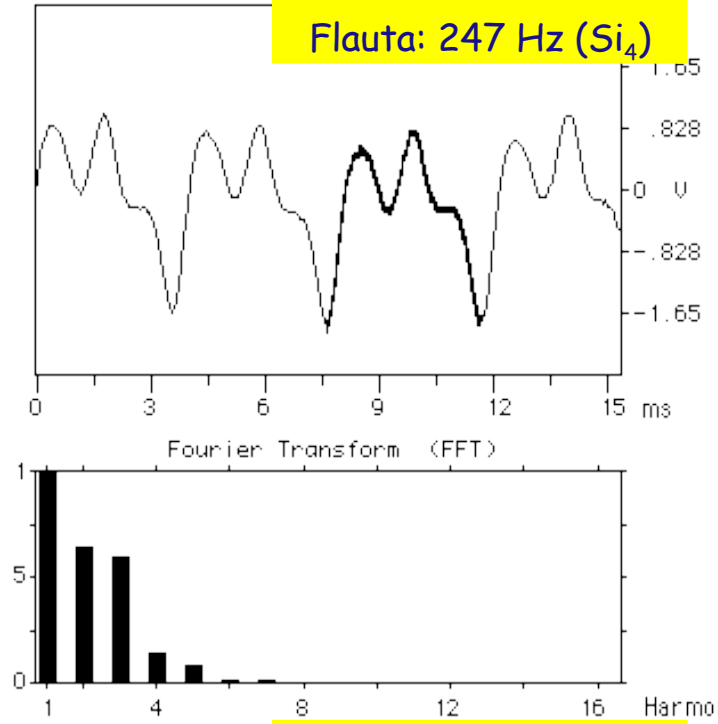

Sound Level vs Time
Trombone
Sound Level (volts)
4.0
3.5
3.0
2.5
2.0
1.5
0.000
0.002
0.004
0.006
0.008
0.010
Time (s)


Sound Level vs Time
Trumpet
Sound Level (volts)
3.0
2.5
2.0
0.000
0.002
0.004
0.006
0.008
0.010
Time (s)


FFT-Sound Level_1 vs Frequency_1
Peak Freq: 234
Trombone
FFT-Sound Level_1 (volts)
0.4
0.3
0.2
0.1
0.0
0
500
1000
1500
2000
2500
Frequency_1 (Hz)

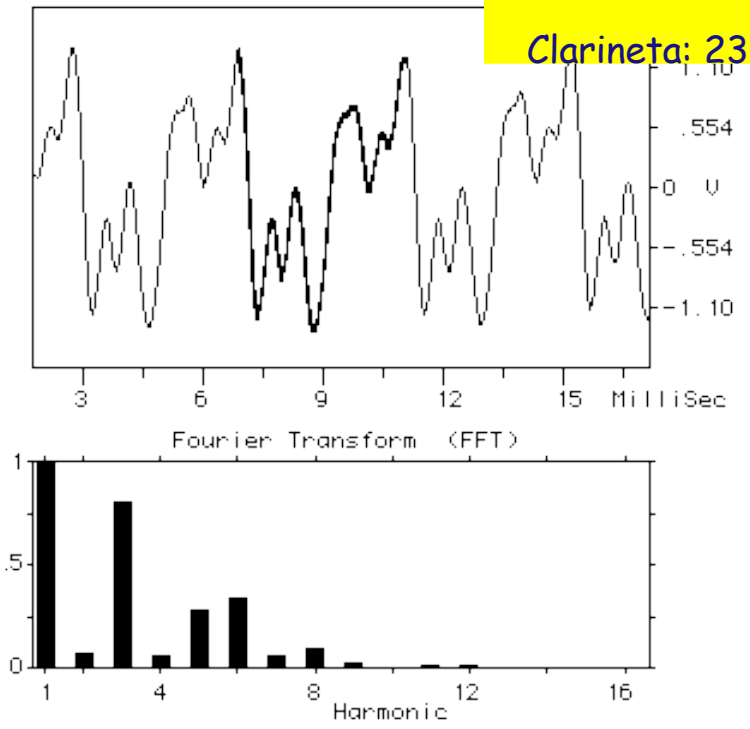

FFT-Sound Level_1 vs Frequency_1
Peak Freq: 234
Trombone
FFT-Sound Level_1 (volts)
0.4
0.3
0.2
0.1
0.0
0
500
1000
1500
2000
2500
Frequency_1 (Hz)

Flauta: 247 Hz (Si_4)



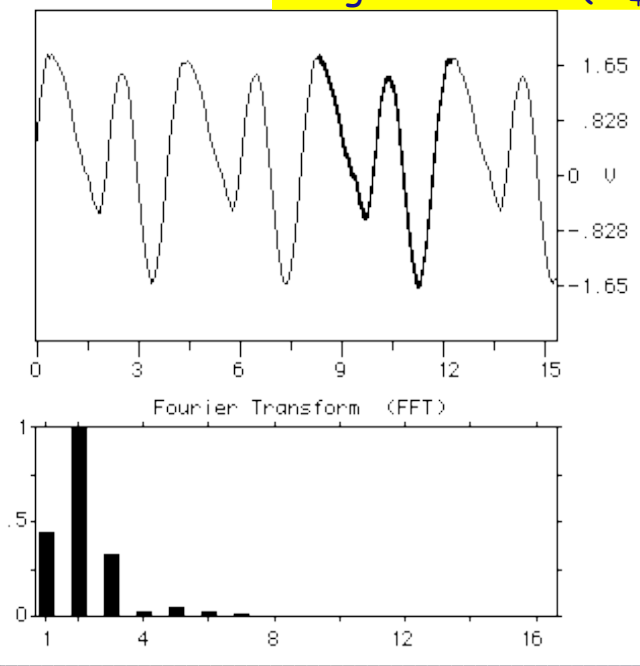
Harmonic	Amplitude
1	1.00
2	.65
3	.61
4	.15
5	.09
6	.02
7	.02
8	.01
9	.01
10	.01
11	.00

Clarineta: 233 Hz (Si_{b3})



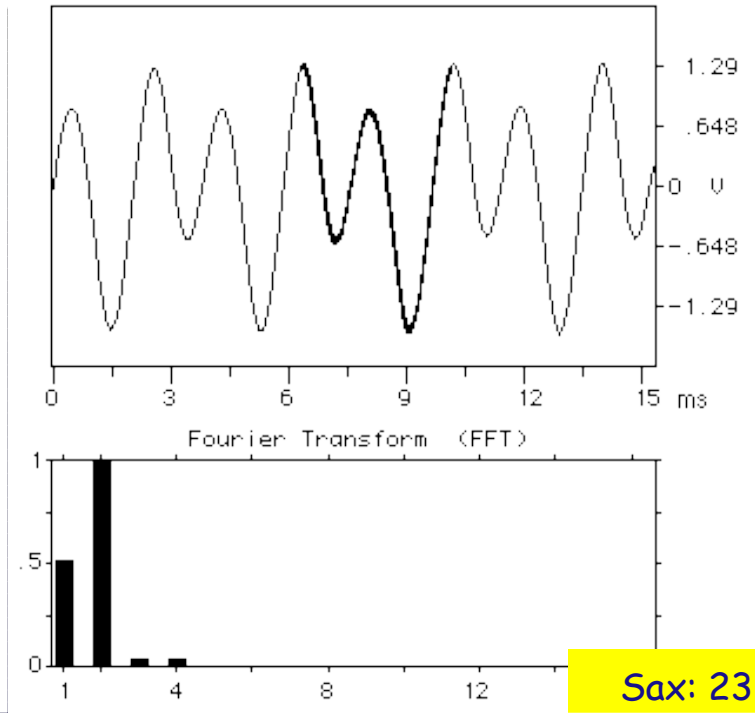
Harmonic	Amplitude
1	1.00
2	.08
3	.82
4	.07
5	.29
6	.35
7	.06
8	.10
9	.03
10	.01
11	.02
12	.02
13	.01
14	.00

Fagote: 247 Hz (Si_4)

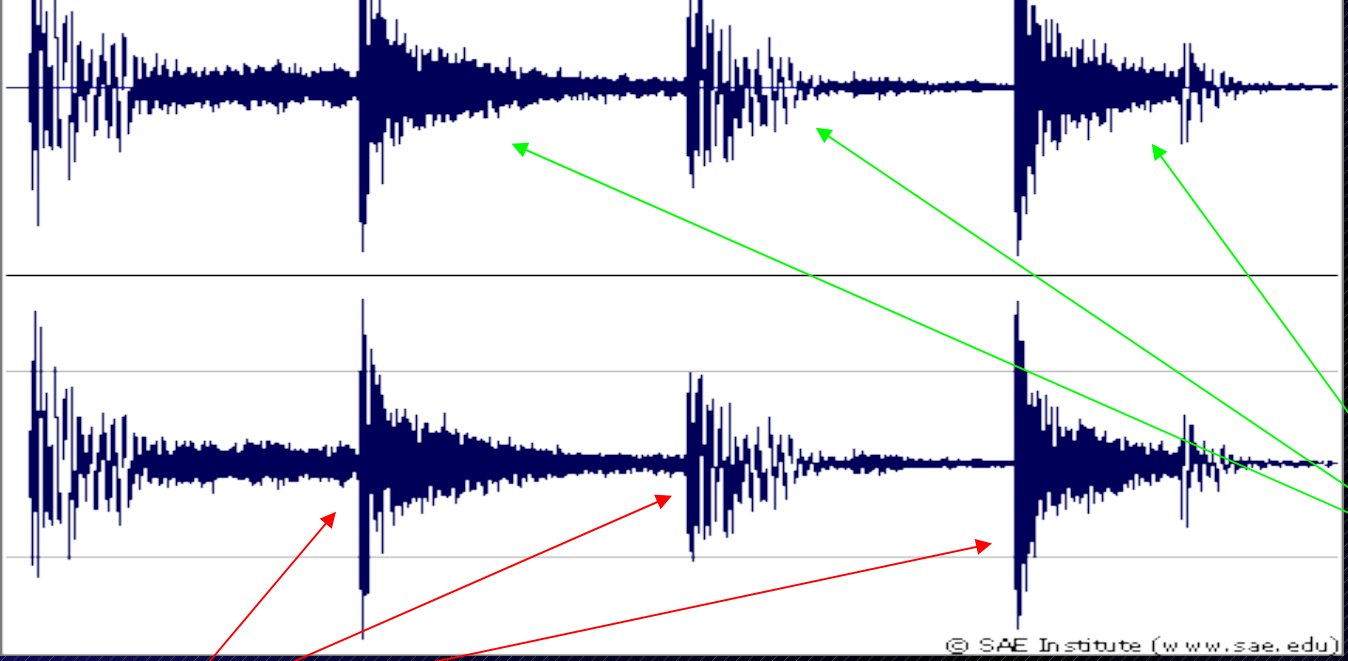


Harmonic	Amplitude
1	.45
2	1.00
3	.34
4	.03
5	.05
6	.03
7	.02
8	.00
9	.00
10	.00
11	.00
12	.00
13	.00
14	.00
15	.00
16	.01

Sax: 233 Hz ($Dó_4$)



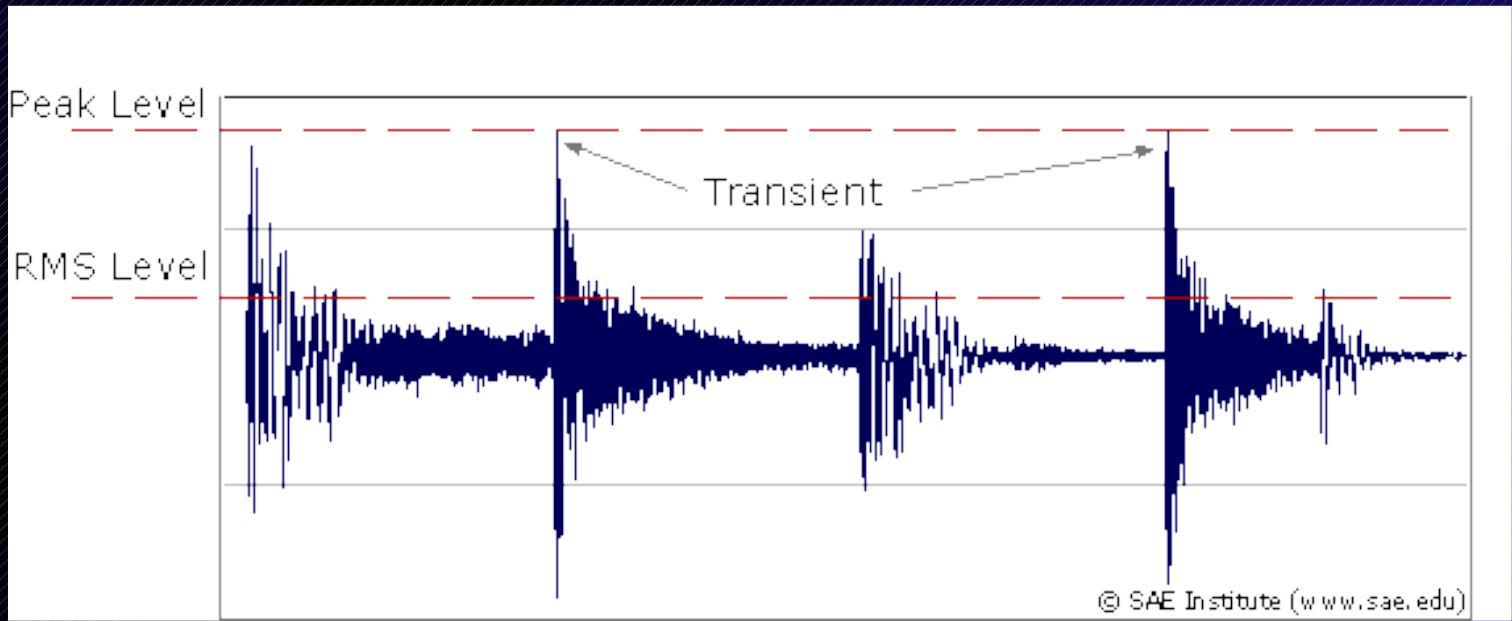
Harmonic	Amplitude
1	.52
2	1.00
3	.04
4	.04
5	.01
6	.00
7	.00
8	.00
9	.00
10	.00



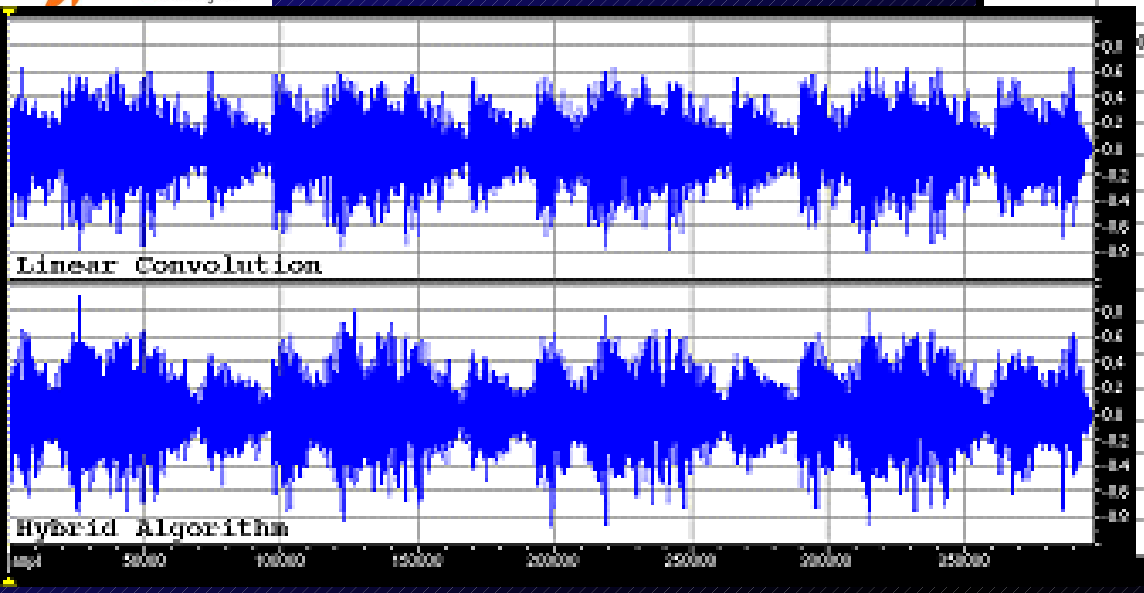
Decaimento

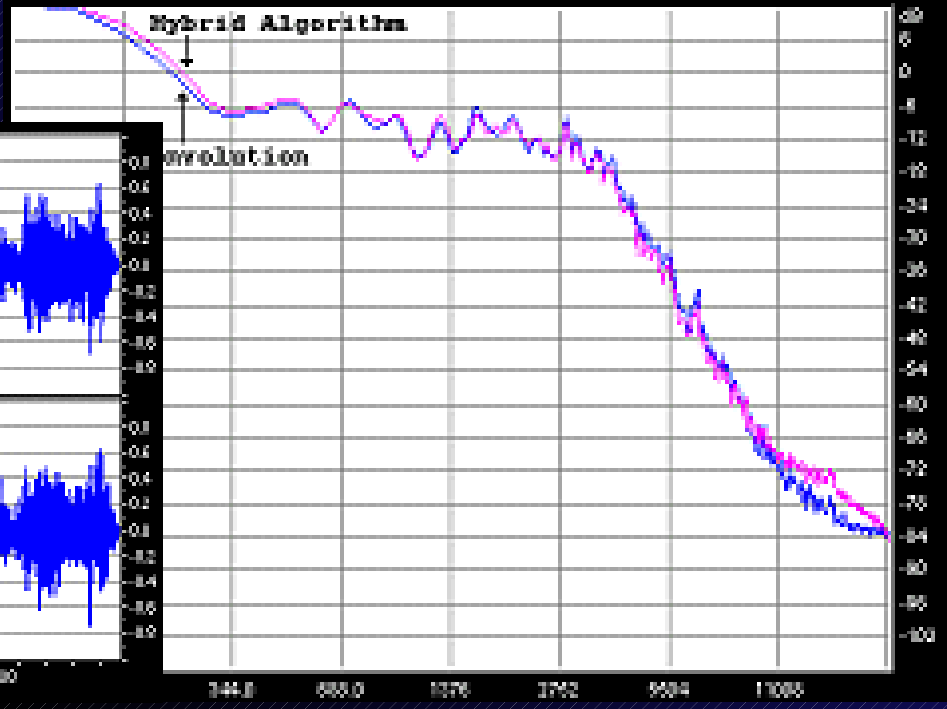
Ataque

Percussão

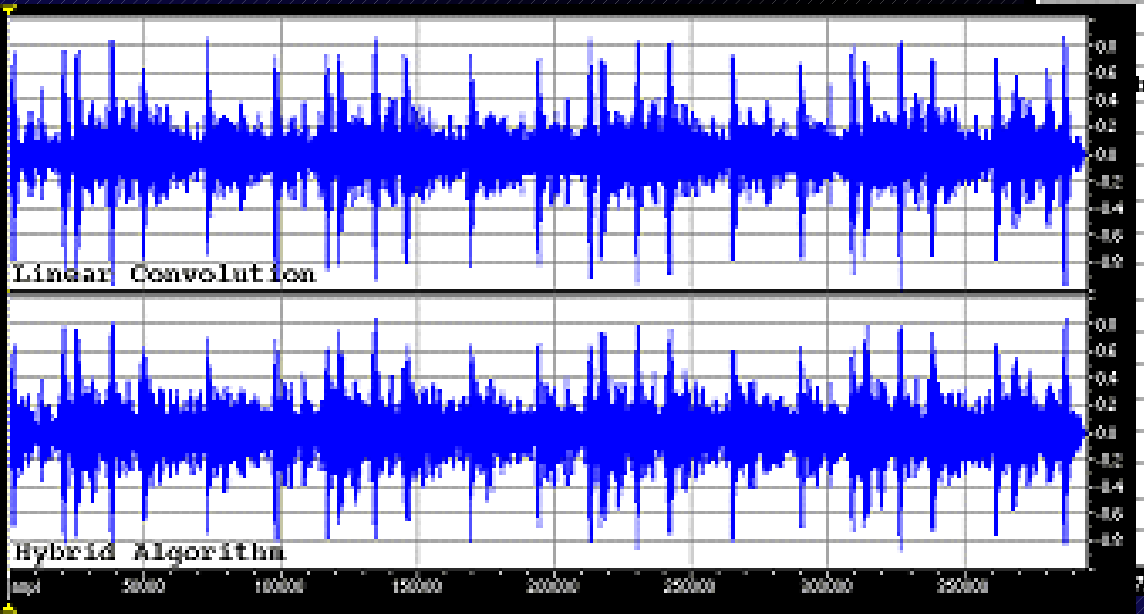


Instituto de Projetos e Estudos em Educação

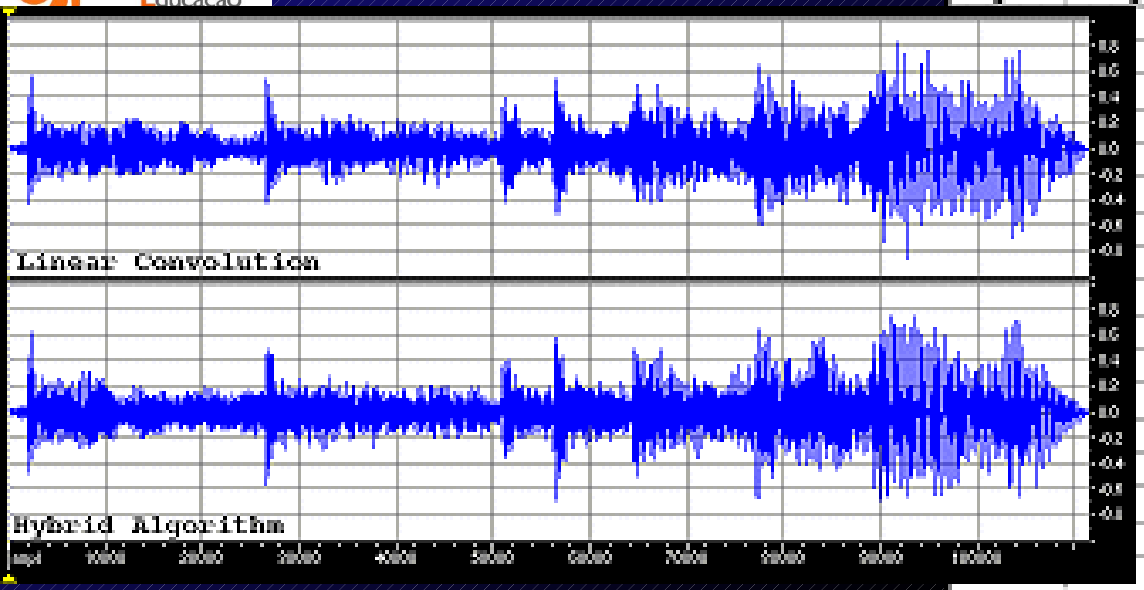


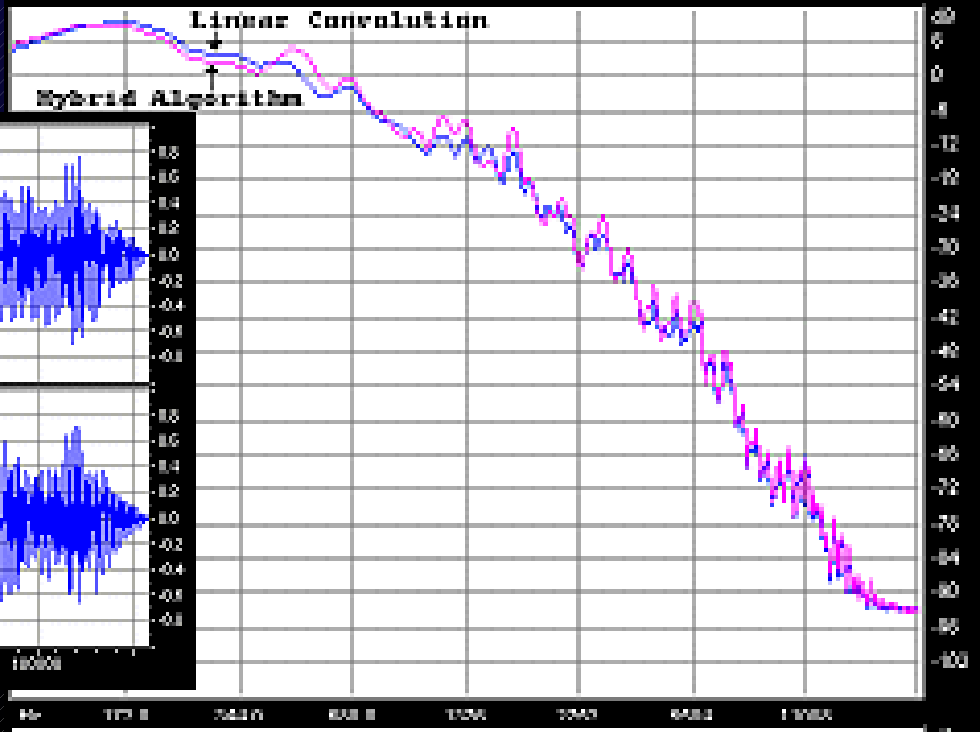


Percussão

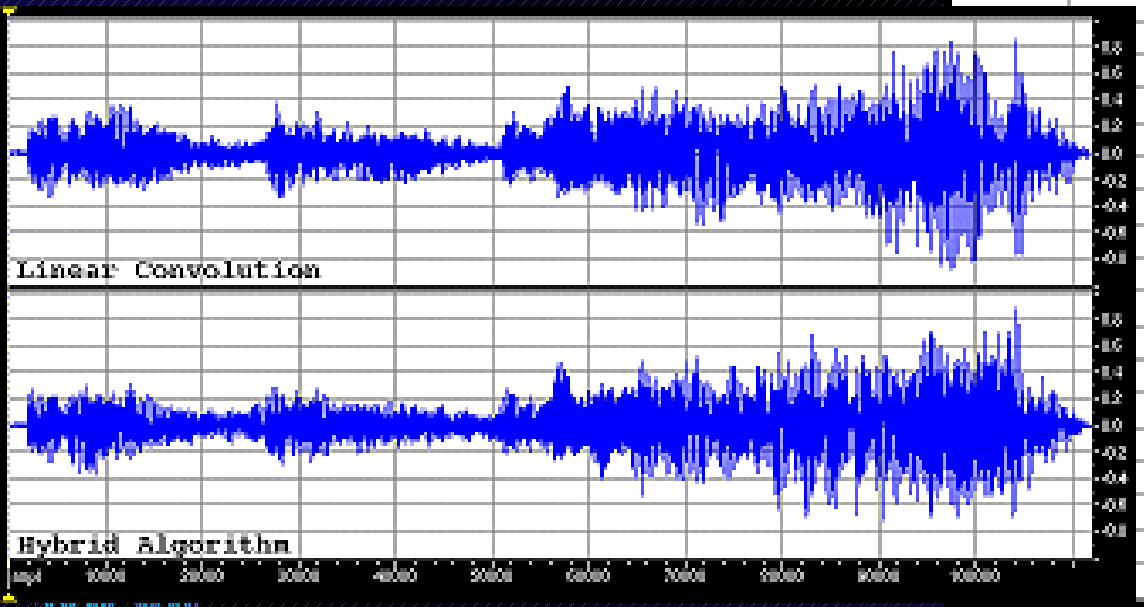


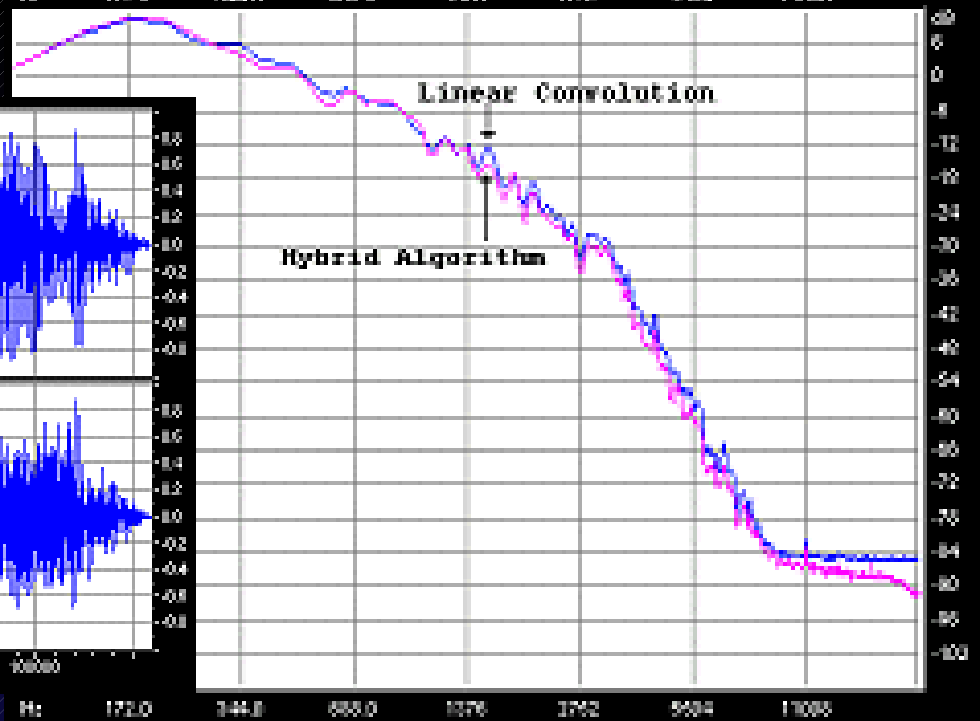
Instituto de Projetos e Estudos em Educação

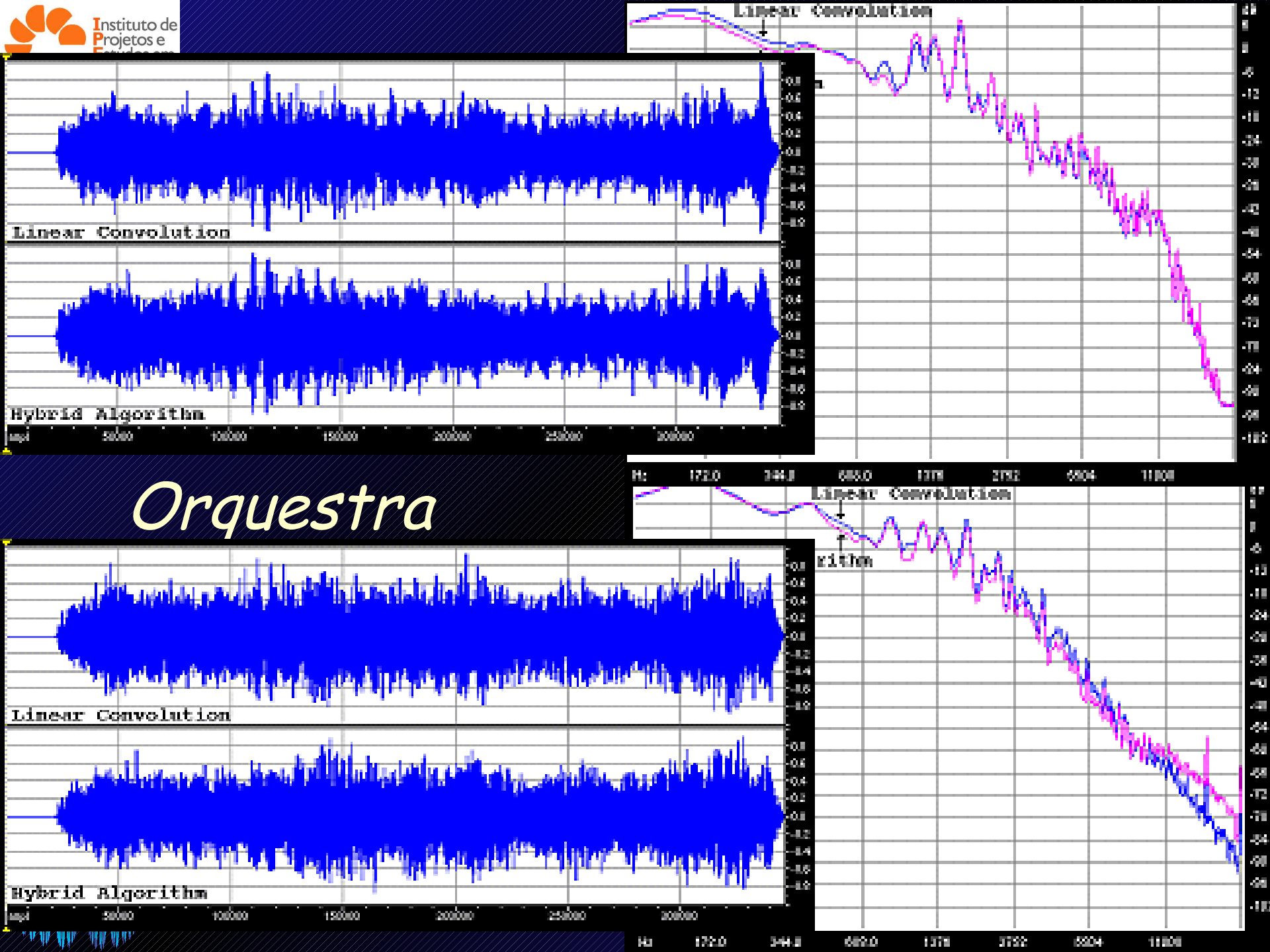




Guitarra

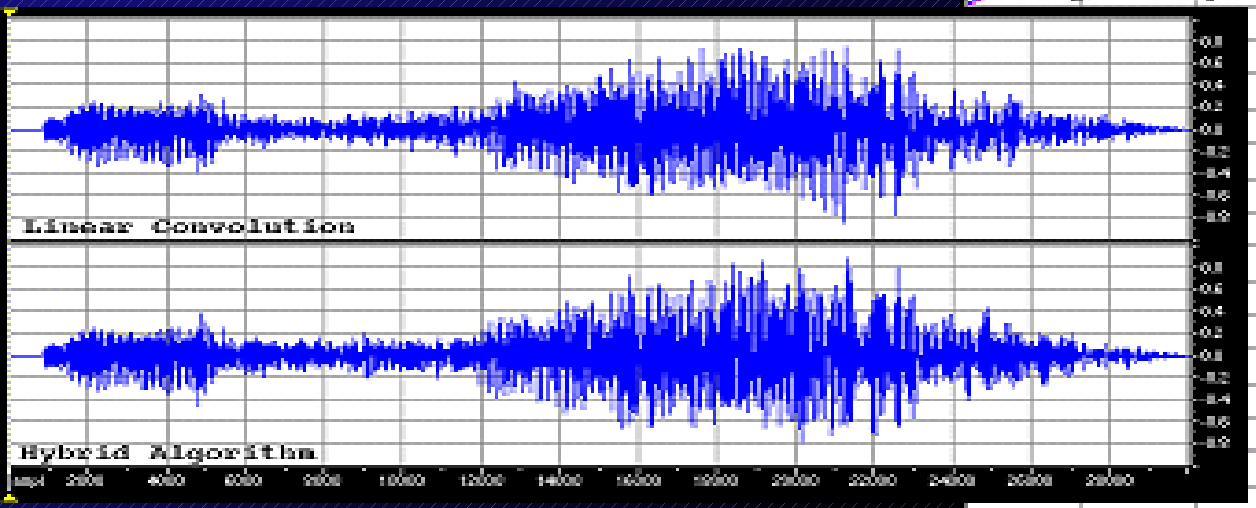


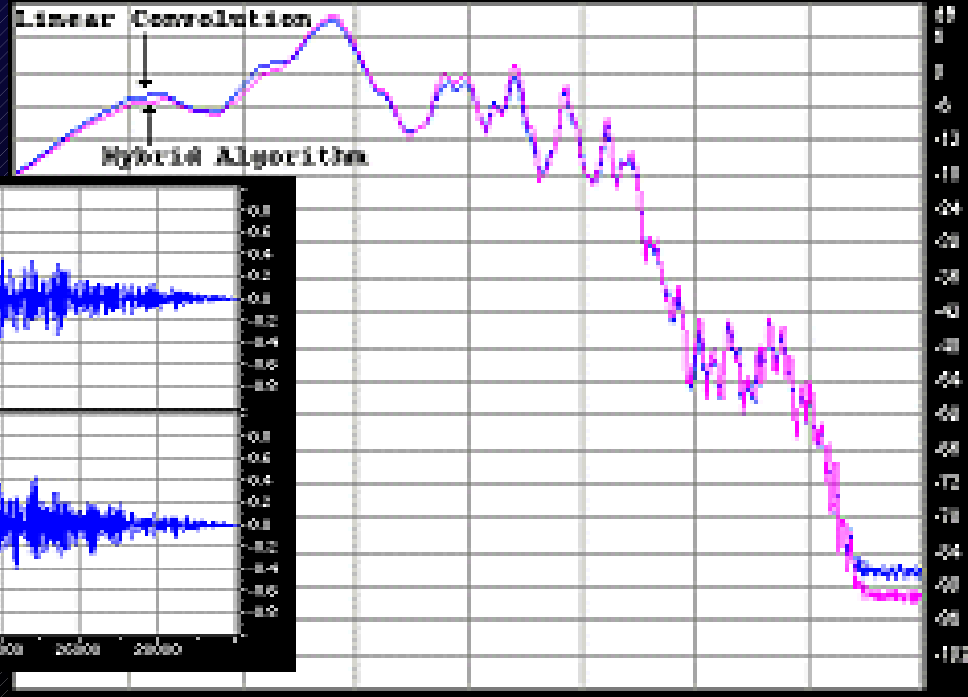


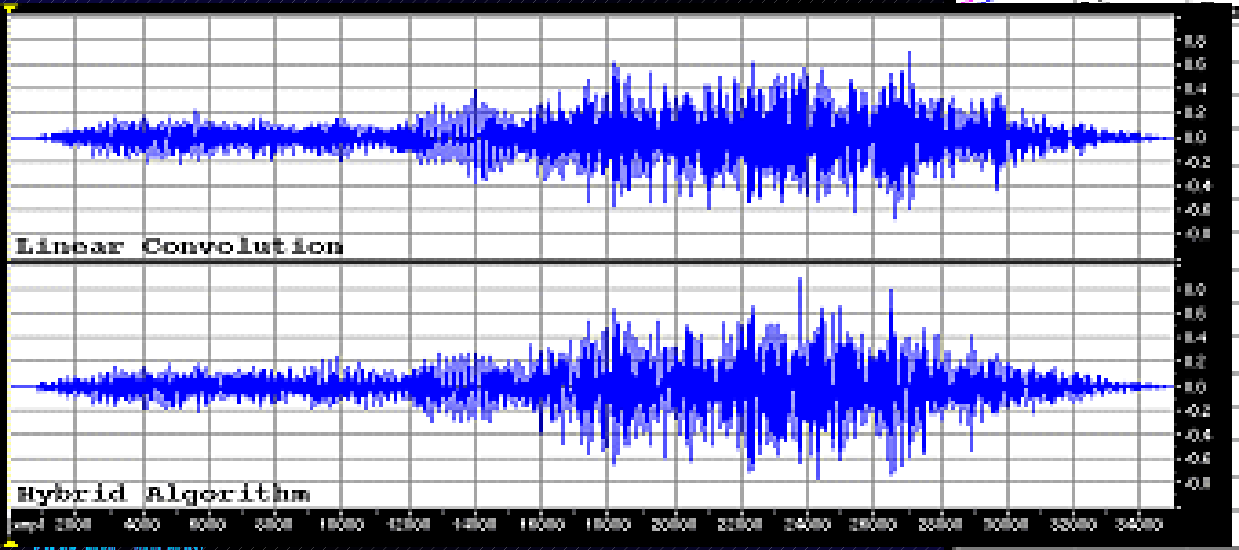

Instituto de Projetos e
Linear Convolution
Linear Convolution
Hybrid Algorithm
Orquestra
Linear Convolution
Linear Convolution
Hybrid Algorithm

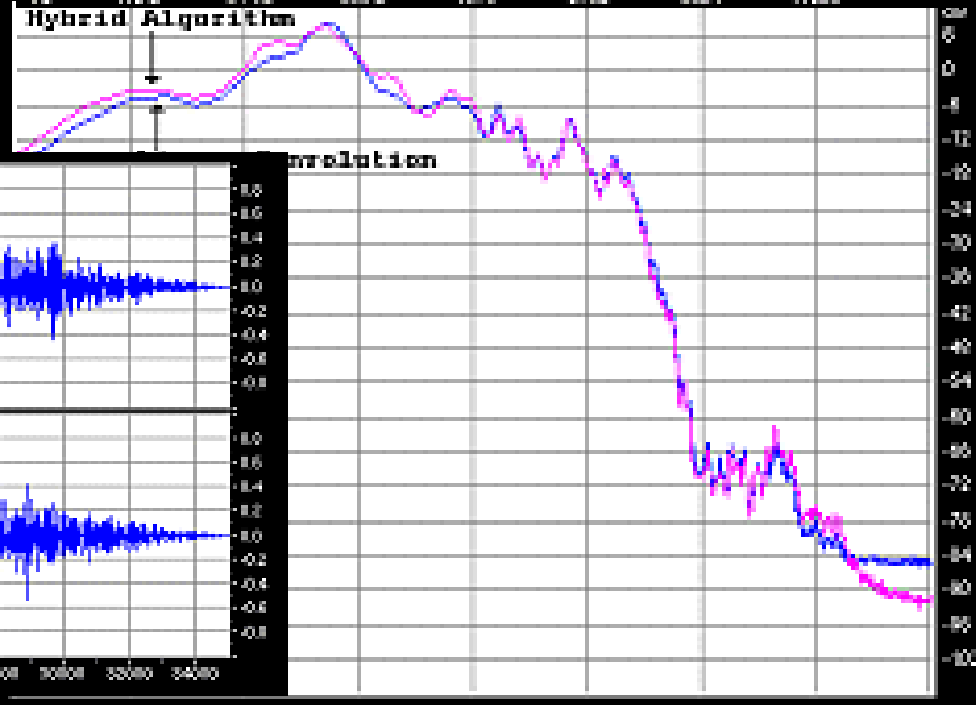
Instituto de Projetos e Estudos em Educação

Voz humana







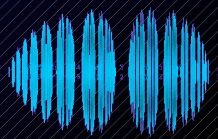


Conclusão

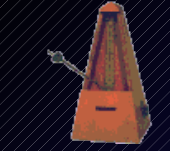
1) Nossa proposta foi apresentar alguns dos princípios em que a Acústica se baseia, os mecanismos de produção de som, o conceito das séries e da análise de Fourier e algumas das diferenças entre sons produzidos por diversos instrumentos e voz humana.

2) Com isso, obtivemos os elementos necessários para compreender a diferença entre sons gerados por diferentes instrumentos musicais, a partir da análise da sua série harmônica, ou "assinatura sonora"

3) Essa assinatura mostra que a Física pode estar direta e intimamente ligada aos detalhes da percepção musical.



Conclusão



4) Física e Música... a arte, de um modo geral, nunca será objetiva e precisa a ponto de permitir unanimidades. Porém, as simetrias e belezas observadas nas leis que governam a combinação das estruturas matemáticas usadas na descrição dos sons guardam estreita relação com a área da Música conhecida como Harmonia.
5) Física e a Matemática permitem a descrição e compreensão objetivas das infinitas possibilidades de combinações de sons criadas pelos grandes mestres da Música. Elas podem ser vistas, ao invés de ouvidas, na análise sonora de suas obras e no perfeito equilíbrio entre as formas de ondas instintivamente combinadas para formá-las.

Referências do texto

1. "Ensaios Analíticos" (Mario Henrique Simonsen), cap. 5. Editora da Fundação Getúlio Vargas, 2ª edição, Rio de Janeiro/RJ, 1994.
2. "Dicionário Grove de Música – Edição concisa" (Editado por Stanley Sadie). Jorge Zahar Editora, Rio de Janeiro/Brasil, 1994.
3. "Exploring music: the science and technology of tones and tunes" (Charles Taylor). Institute of Physics Publishing, Philadelphia/EUA, 1992.
4. "Music, Physics and Technology" (Harry Olson). Dover Publications, Inc., 2nd edition, New York/USA, 1967.
5. "Treatise on harmony" (Jean Phillipe Rameau). Dover Publications, Inc., New York/USA, 1971.
6. "How things work – the physics of everyday life" (Louis P. Bloomfield). John Wiley & Sons, Inc., New york/USA, 1997.
7. "Waves – Berkeley Physics Course, vol. 3" (Frank S. Crawford, Jr.). McGraw Hill Book Company, New York/USA, 1973.
8. "O som e o sentido" (João Miguel Wisnick). Companhia das Letras, 2ª edição, 1998.
9. "The Physics of the Musical Instruments" (N. Fletcher e T. Rossing), Springer, 2ª edição, 1998.

Instituto de Projetos e Estudos em Educação

Sites de algumas das figuras apresentadas neste trabalho...

- http://www.sao.edu
- http://members.tripod.com/caraipora (Prof. Luis Neto)
- http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/music
- http://debussy.music.ubc.ca/courses/319/index.html
- http://home.cord.edu/dept/physics/p128/index.html
- http://www.music.miami.edu/programs/Mue/mue2003/research/sbrowne/chap6.html