

Vibrações e Ruído

Capítulo 5

Introdução ao Ruído



Acetatos e imagens baseados em:
- Apontamentos Chedas Sampaio
- Apontamentos Nuno Martinho



- Definição de Som e Ruído
- Diferença entre Vibração e Ruído
- Ouvido
- Diferença de Som e Ruído
- Acústica
 - Velocidade de propagação
 - Frequência e Comprimento de Onda
 - Potência sonora
 - Intensidade sonora
 - Nível de pressão sonora
 - Nível de intensidade
 - Nível de potência



Definição de Som e Ruído

O **Som** é a sensação auditiva resultante de variações da pressão do ar, as quais têm sempre origem numa qualquer fonte de vibração.



Quando esta sensação é desagradável costuma designar-se o som por **Ruído**.



Definição de Som e Ruído - Acústica

Capítulo 5

Para existir um Som ou um Ruído, é necessário existir uma perturbação (variações de pressão no ar) gerada por uma **fonte**, um **meio** onde essa perturbação vai ser conduzida e um **recetor** que vai registar essa perturbação (microfone ou ouvido).
Este **meio** pode ser um solido, um liquido ou um gás (ar).



Fonte
(coluna de som)

Meio
(ar)

Recetor
(ouvido)

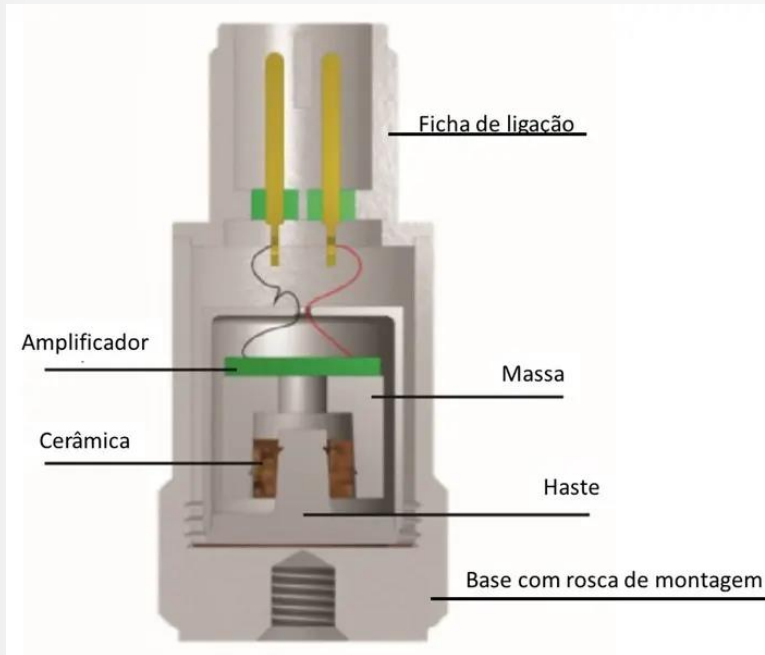


Diferença entre Vibração e Ruído

Capítulo 5

Vibrações e Ruído

O que distingue um Ruído e de uma Vibração é pequena. As Vibrações são **oscilações estruturais** e o Ruído são **oscilações do ar**. A instrumentação usada para medir Vibrações e o Ruído só difere nos transdutores (**acelerómetro vs microfone**).



Acelerómetro

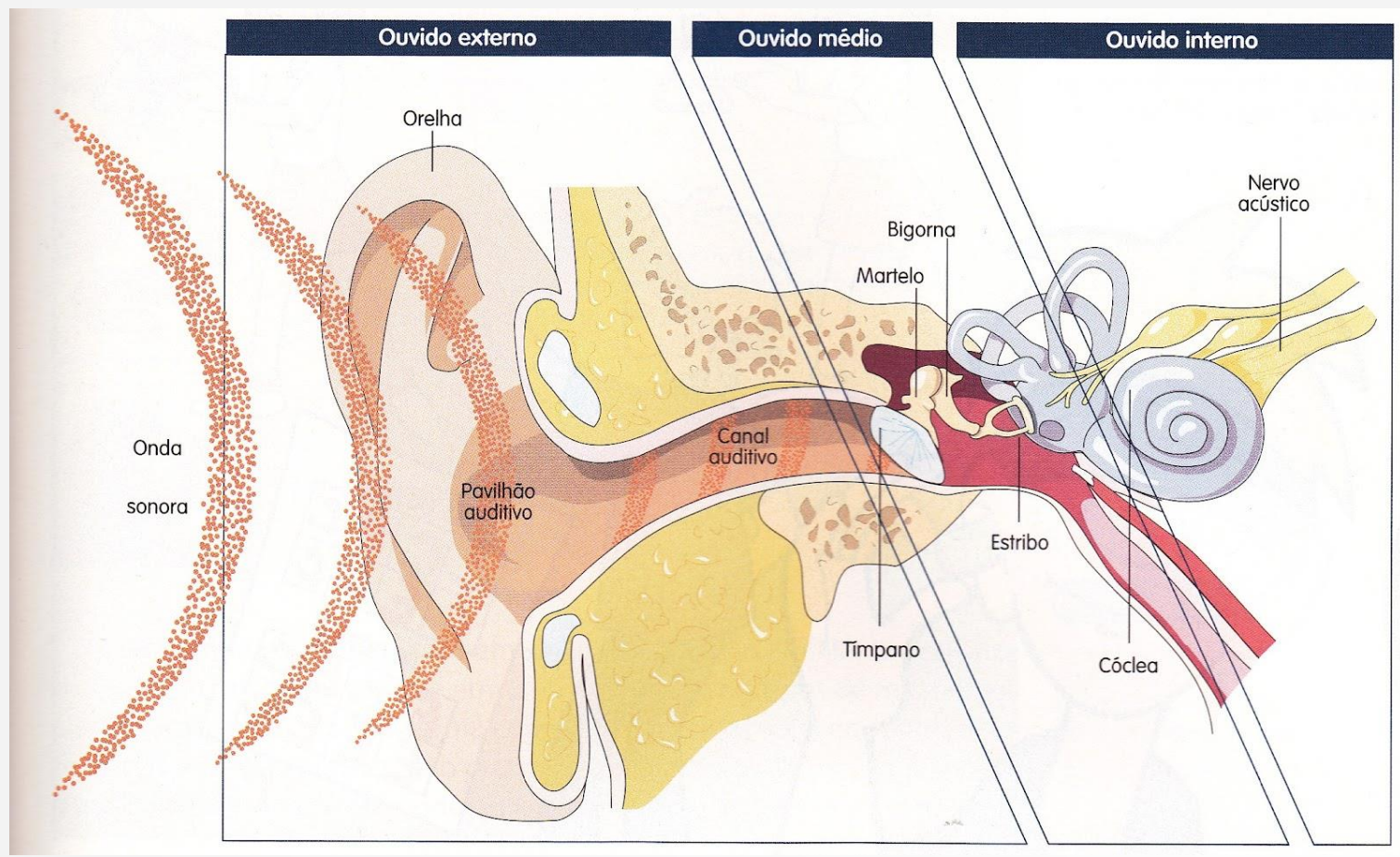


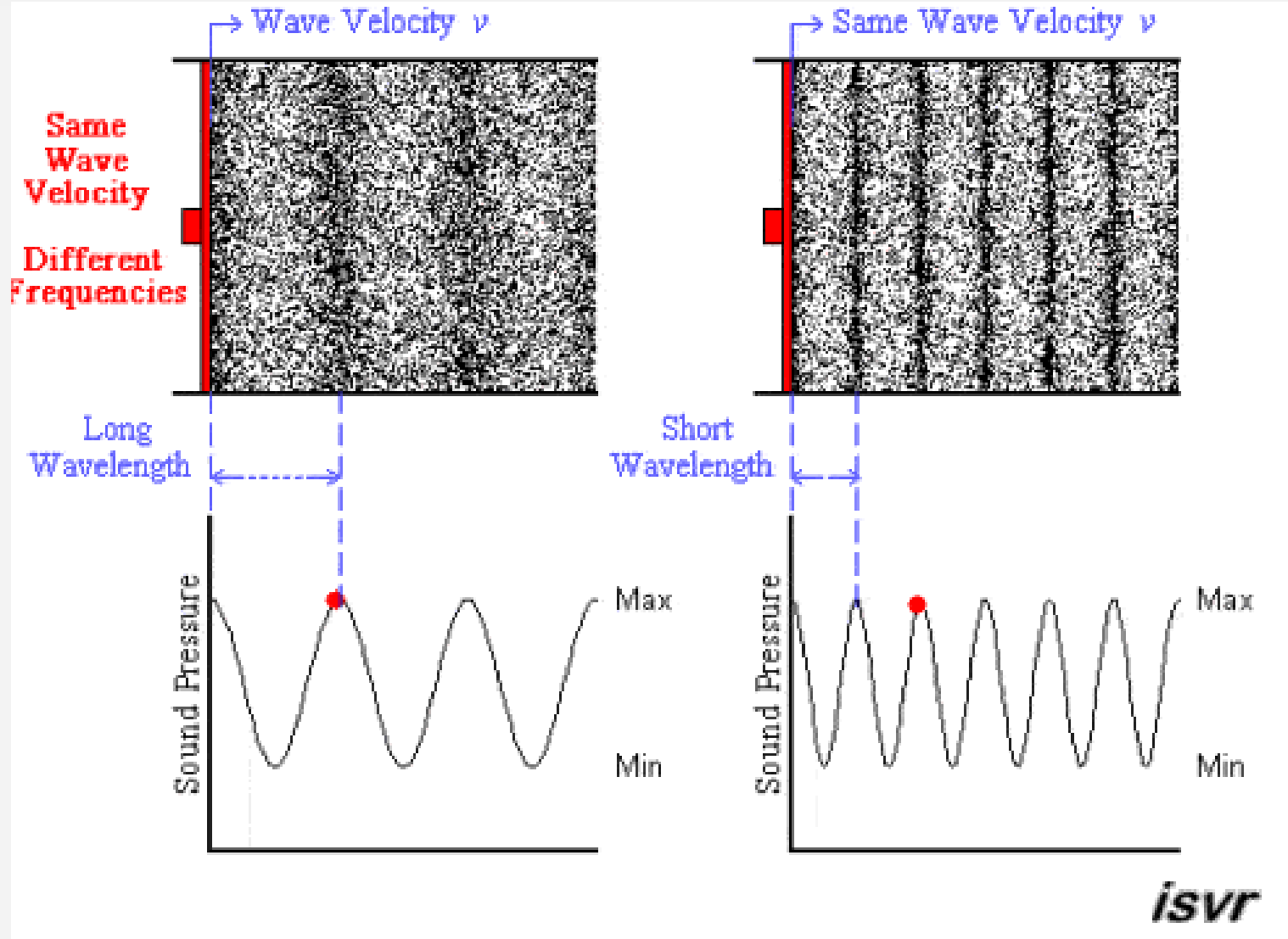
Microfone



Ouvido

O ouvido é um transdutor que converte os ondas de pressão sonora em sinais que são transmitidos ao cérebro.





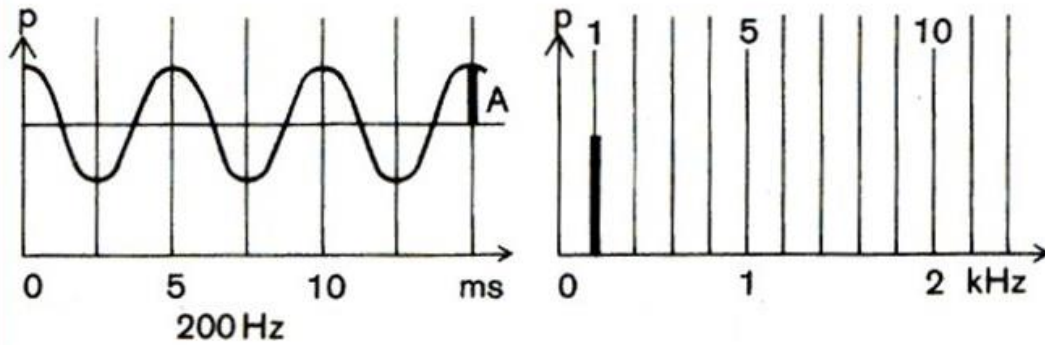


Diferença de Som e Ruído

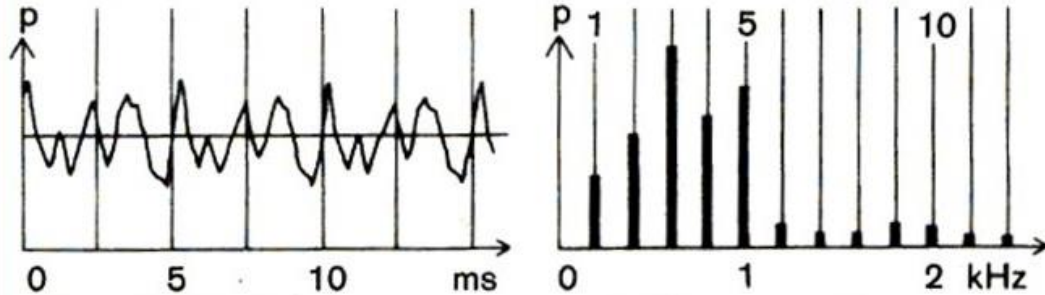
Capítulo 5

Vibrações e Ruído

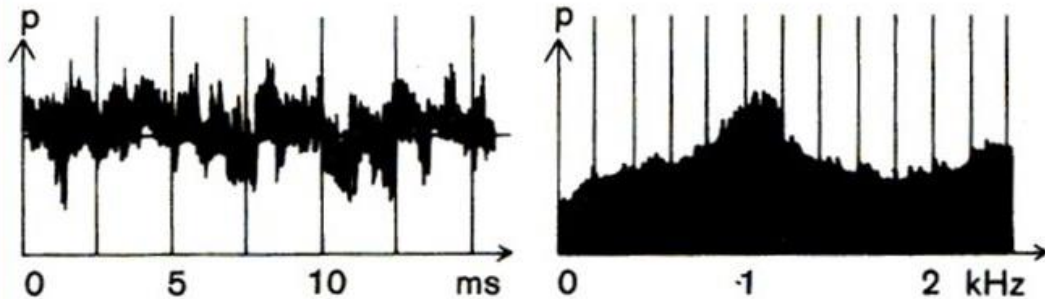
Tom



Som



Ruído



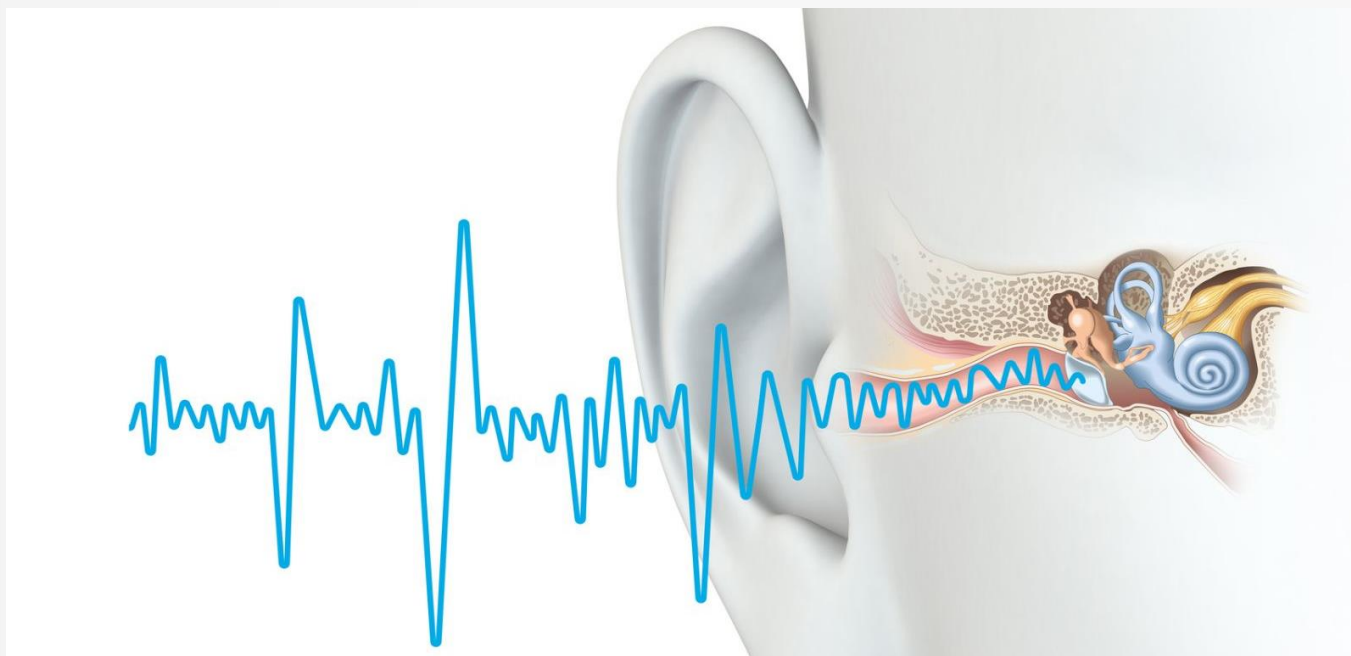


Efeitos do Ruído no homem

Capítulo 5

Vibrações e Ruído

“O **Ruído** é uma energia de muito baixa intensidade (na ordem dos 10 - 12 Watts). Para muitos tipos de máquinas, a energia sonora emitida é uma fração da potência mecânica ou elétrica (tipicamente entre 0.001% e 0.01%). Esta pequeníssima quantidade de energia é sentida pela extraordinária sensibilidade do ouvido humano. Por isso, também se torna um problema.”



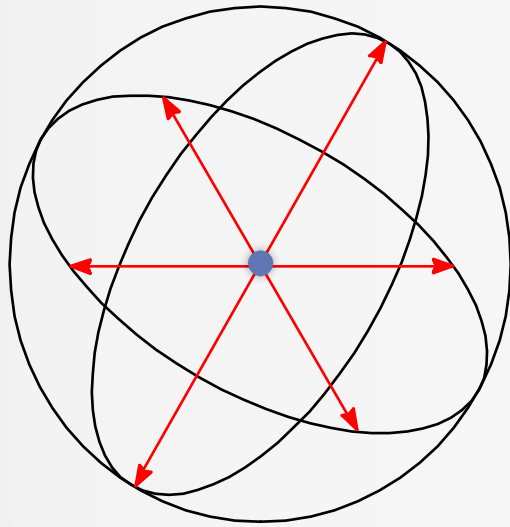


Acústica - Propagação do Som

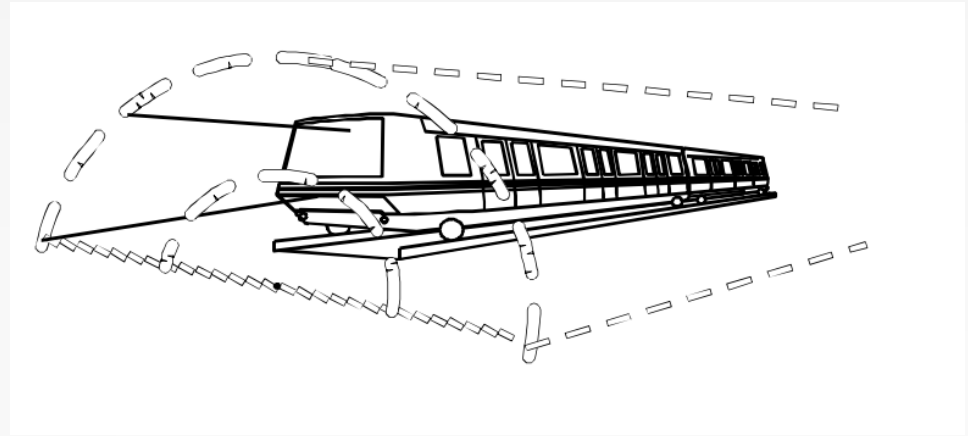
Capítulo 5

“Teoricamente, a partir de uma fonte pontual, o som propaga-se em forma de ondas esféricas. A presença de obstáculos e a não uniformidade do meio (ventos e/ou gradientes de temperatura) podem dificultar este modelo.”

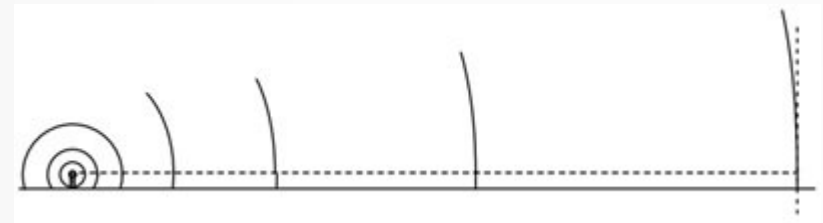
Vibrações e Ruído



Propagação Esférica
fonte pontual



Propagação Cilíndrica – fonte linha



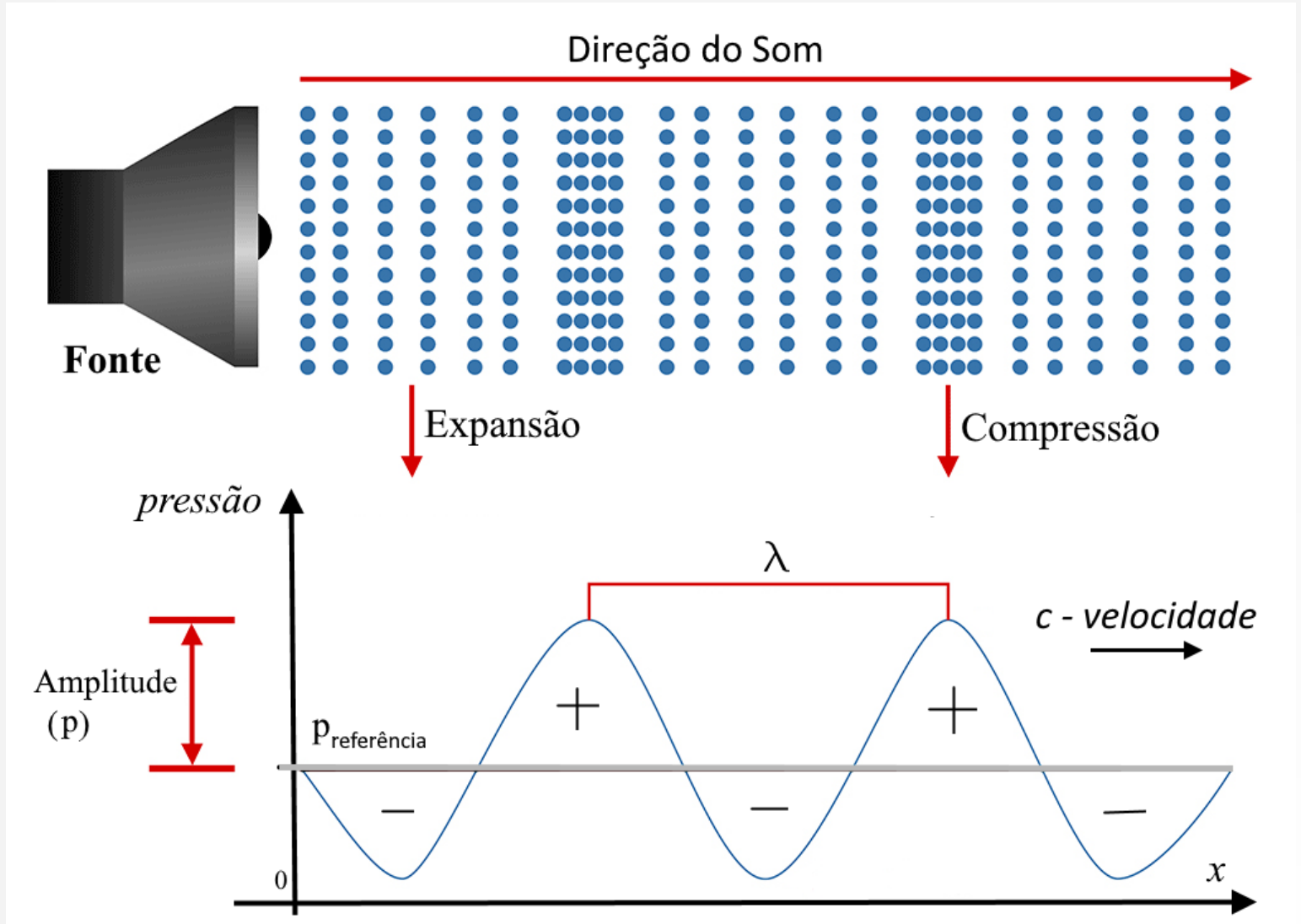
Propagação Plana – fonte conduta



Acústica - Onda Sonora - Caracterização

Capítulo 5

Comprimento de onda (λ), Frequência (f) e Amplitude (p).



Vibrações e Ruído



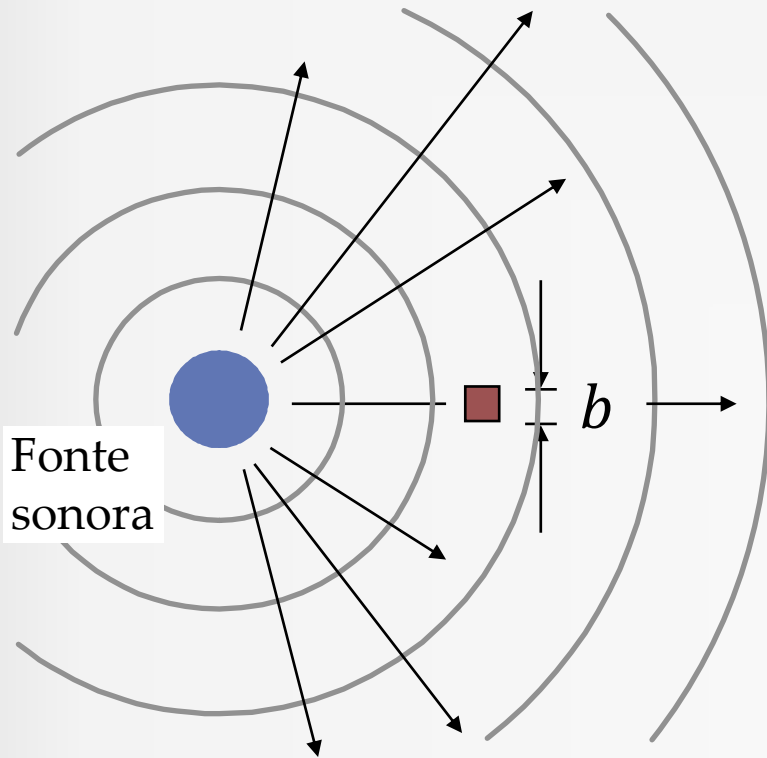
Acústica - Propagação do Som - Difração do Som

Capítulo 5

Vibrações e Ruído

λ - Comprimento de onda

$b \ll \lambda$

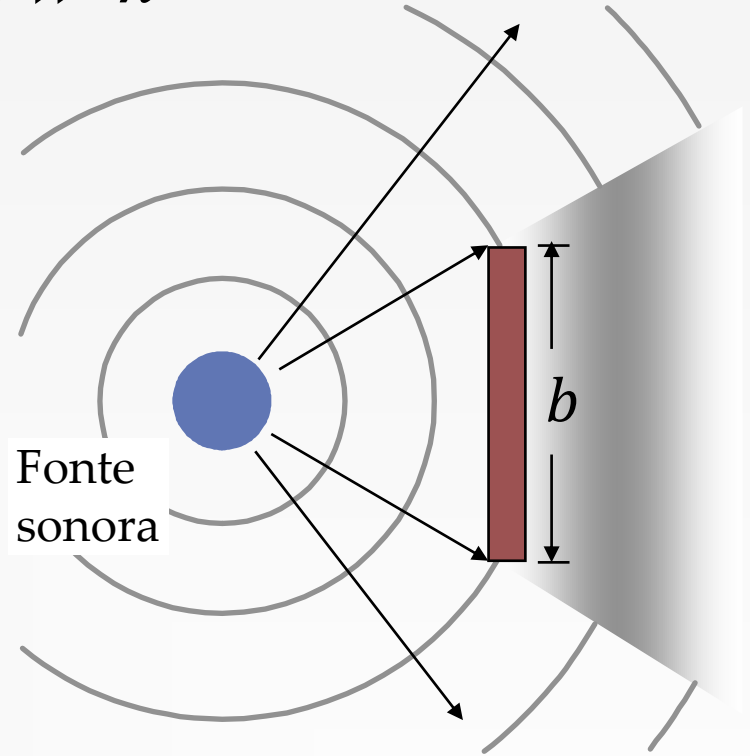


Fonte sonora

$$b = 0,1 \text{ m}$$

$$\lambda = 0,344 \text{ m } (f = 1000 \text{ Hz})$$

$b \gg \lambda$



Fonte sonora

$$b = 1 \text{ m}$$

$$\lambda = 0,344 \text{ m } (f = 1000 \text{ Hz})$$



Acústica - Onda Sonora - Velocidade de propagação

Tanto os meios sólidos, líquidos e gases possuem inércia e elasticidade e, portanto, podem transmitir ondas sonoras.

A **velocidade de propagação do som nos gases** é:

$$c = \sqrt{\frac{\gamma \cdot p_g}{\rho}} \quad [m/s]$$

$$\gamma = \frac{C_p - \text{calor específico do ar (P = C}^{te})}{C_V - \text{calor específico do ar (V = C}^{te})}$$

c - velocidade do som no meio

γ - relação entre calores específicos do gás a pressão e a volume constantes.

p_g - pressão do gás [N/m^2]

ρ - massa específica do gás [kg/m^3]

A **velocidade do som no ar** é independente de variações de pressão, frequência e comprimento de onda, mas é diretamente proporcional à temperatura.

$$c \approx 331,3 + 0,606 \cdot Temp \quad [m/s]$$

$Temp$ – temperatura do ar em $^{\circ}C$
 $-100^{\circ}C < t < 100^{\circ}C$



Acústica - Onda Sonora - Velocidade de propagação

Capítulo 5

Vibrações e Ruído

Temperatura °C	Velocidade do som [m/s]	Densidade do ar [kg/m ³]
35	351.88	1.1455
30	349.02	1.1644
25	346.13	1.1839
20	343.21	1.2041
15	340.27	1.2250
10	337.31	1.2466
5	334.32	1.2690
0	331.30	1.2922
-5	328.25	1.3163
-10	325.18	1.3413
-15	322.07	1.3673
-20	318.94	1.3943
-25	315.77	1.4224

Meio	Velocidade do som [m/s]
Ar, 21°C	340
Álcool	1213
Pele	1220
Hidrogénio, 0°C	1269
Água doce	1480
Água salgada	1520
Corpo humano	1558
Madeira	3350
Betão	3400
Aço	5050
Alumínio	5120
Vidro	5200



Acústica - Onda Sonora - Comprimento de onda

O comprimento de onda é a distância percorrida pelo som durante um período de uma vibração:

$$\boxed{\lambda = cT} \quad \Rightarrow \quad \boxed{f = \frac{1}{T}} \quad \Rightarrow \quad \boxed{\lambda = \frac{c}{f}}$$

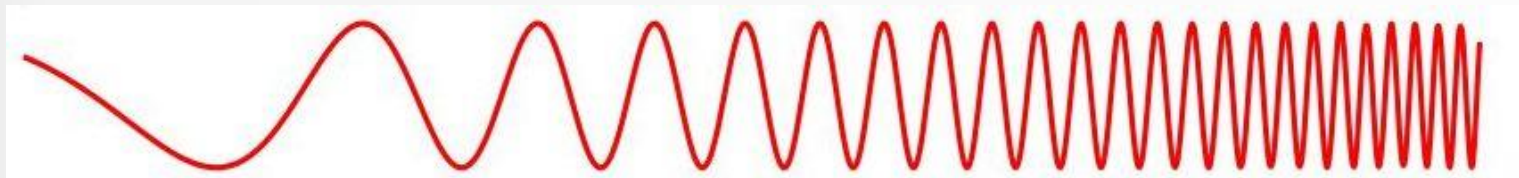
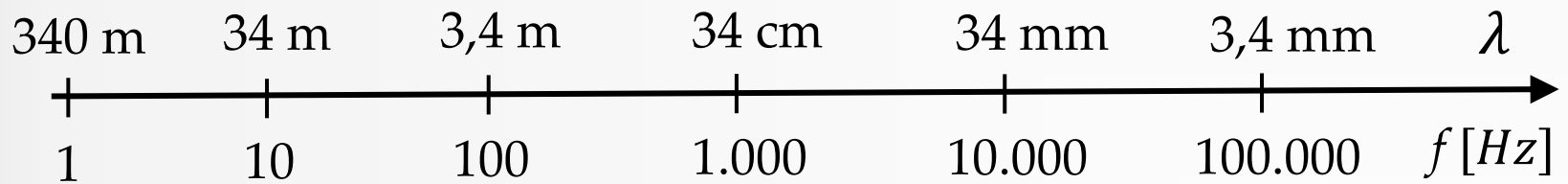
λ - comprimento de onda [m]

c - velocidade do som no meio [m/s]

T - período [s]

f - frequência [Hz]

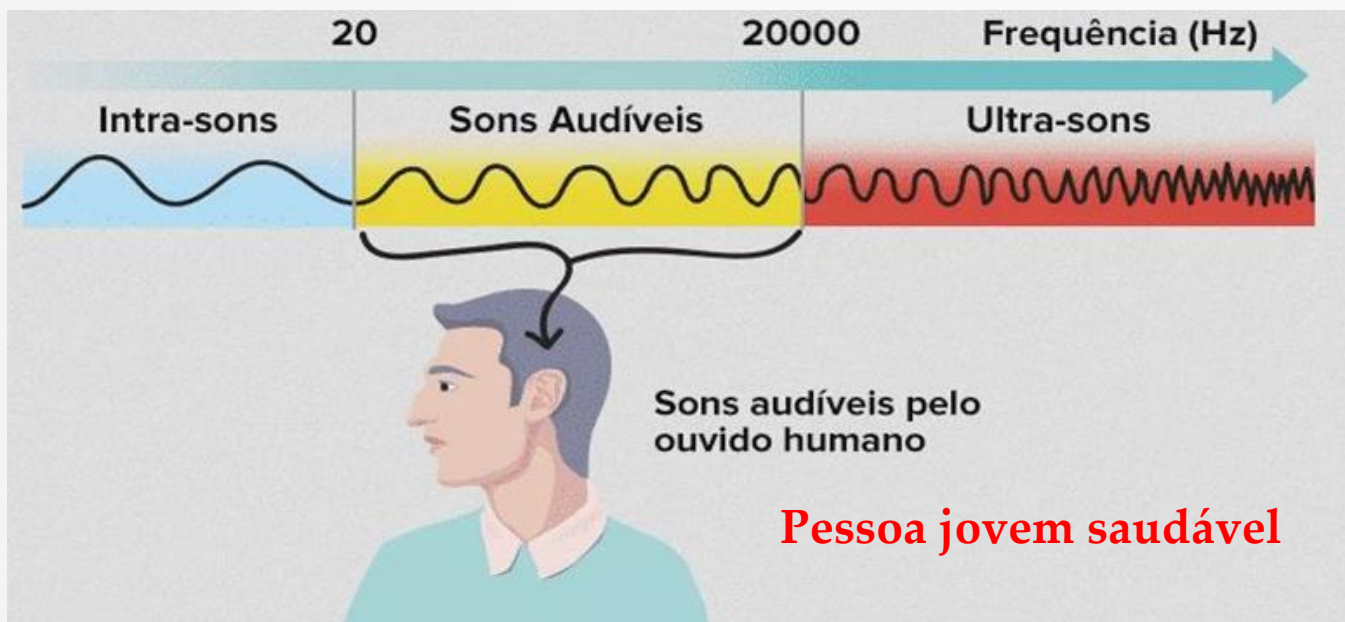
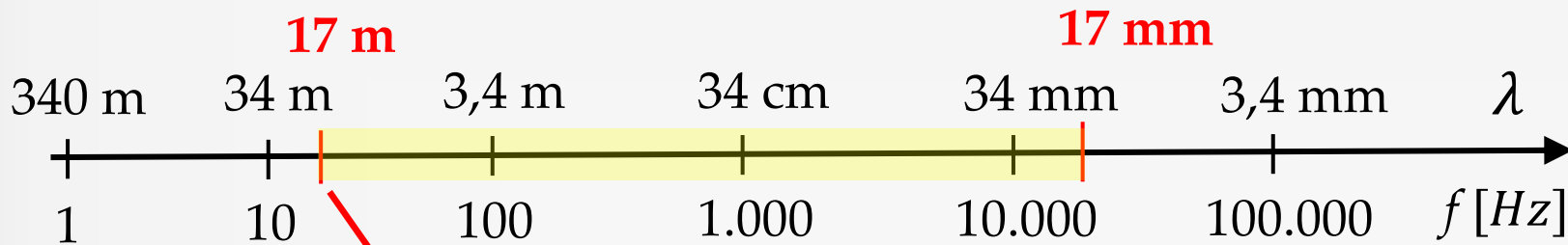
Com a velocidade do som no ar ($c = 340 \text{ m/s}$):





Acústica - Onda Sonora - Frequência

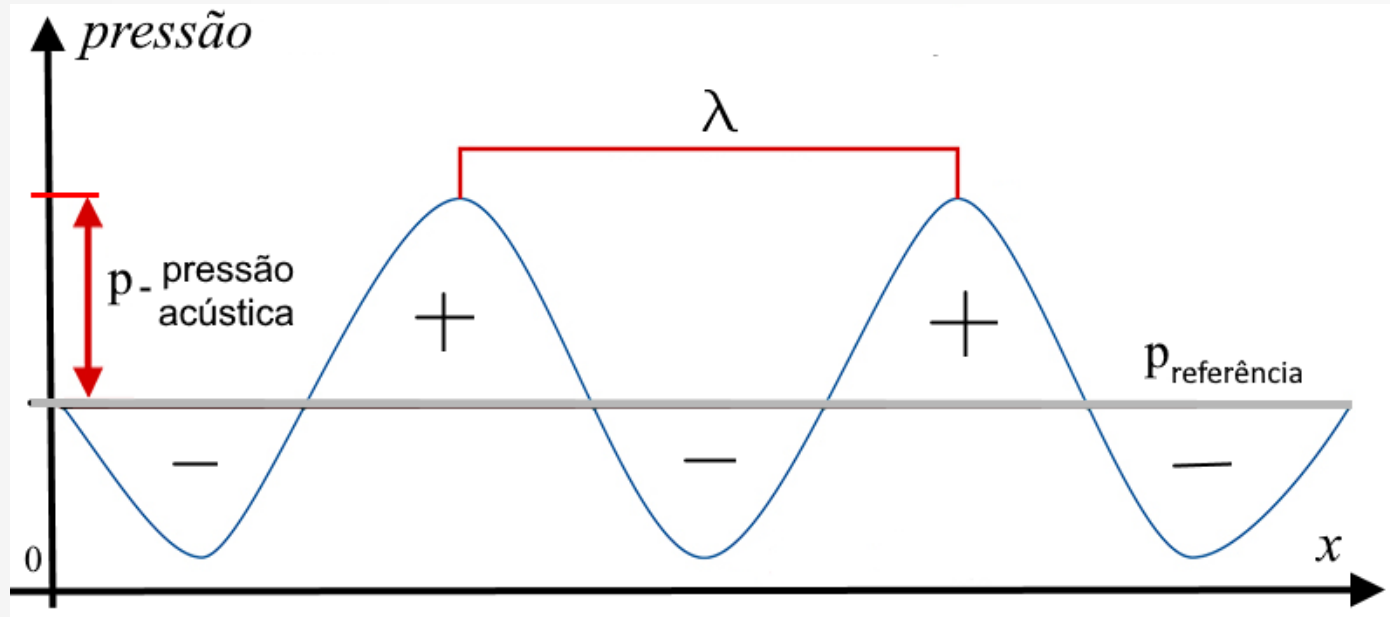
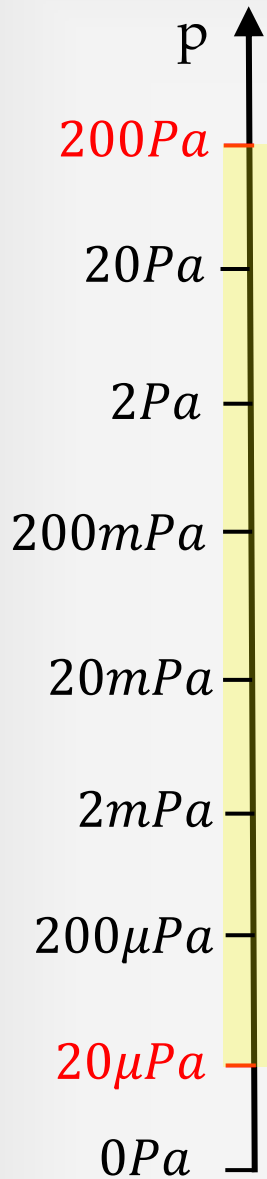
A frequência f é o número de ciclos de variação de pressão no meio por unidade de tempo [Hz].





Acústica - Onda Sonora - Amplitude

A **Amplitude da Onda Sonora** (p - pressão acústica) é a variação da pressão entre dois estados físicos do meio elástico que estão perante uma pressão de referência. (Exemplo: pressão atmosférica = $10^5 Pa = 1 bar$).
O ouvido humano (jovem saudável) consegue detetar pressões acústicas entre: $p = 20\mu Pa$ (limiar de audição) e $p = 200 Pa$ (limiar da dor) com $f = 1000 Hz$





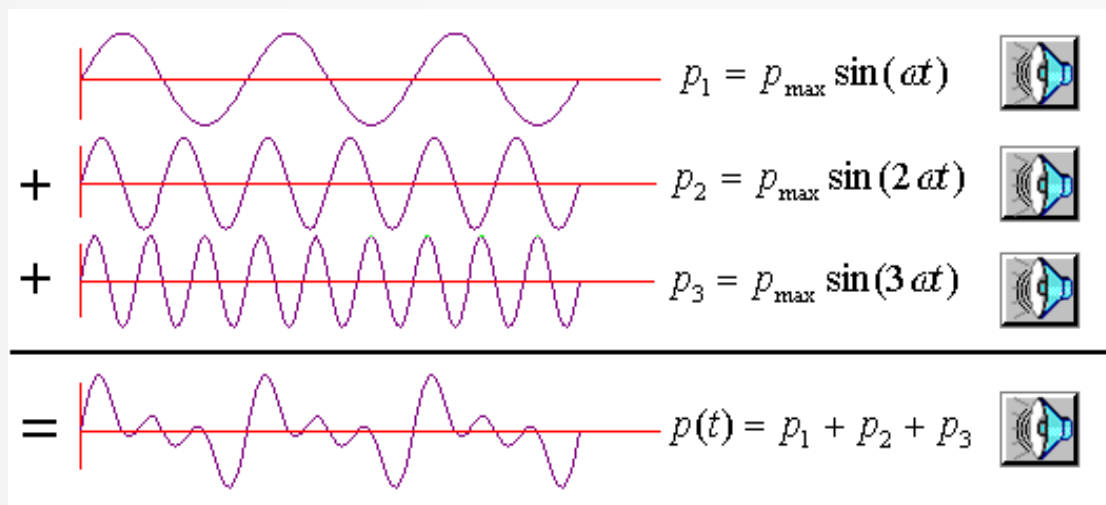
Acústica - Onda Sonora - Adição de tons puros

A frequência caracteriza aquilo que normalmente se designa por altura de um som:

- Quanto **maior a frequência** mais o **som é agudo**;
- Quanto **menor a frequência** mais o **som é grave**;

Um **tom puro** é um som periódico que tem um padrão sinusoidal com uma única frequência - onda simples.

Um **som harmónico** é a adição de vários tons puros.



Um piano apresenta uma gama de 25,5 Hz (nota grave) a 4186 Hz (nota aguda).

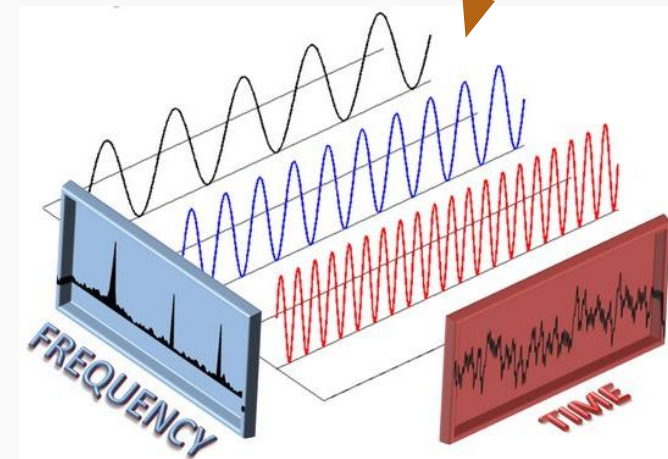
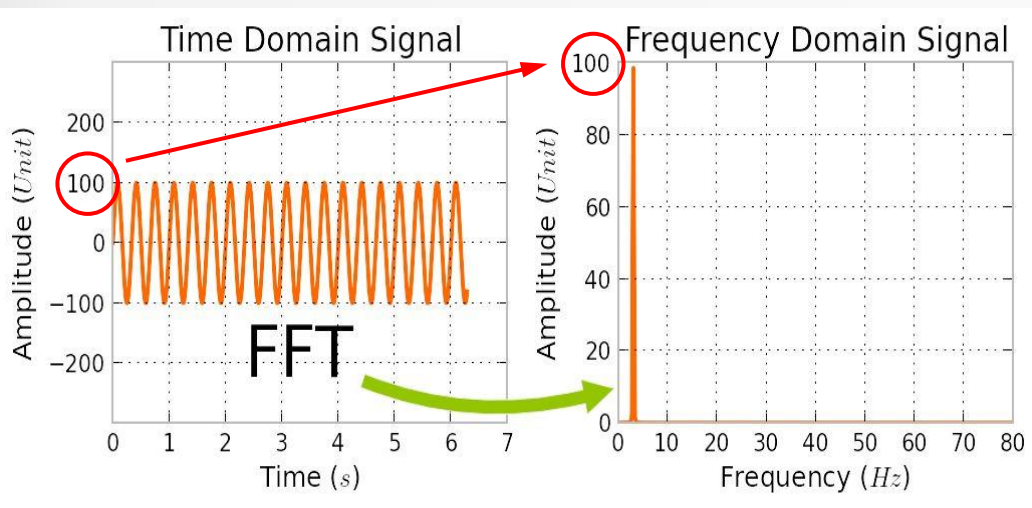
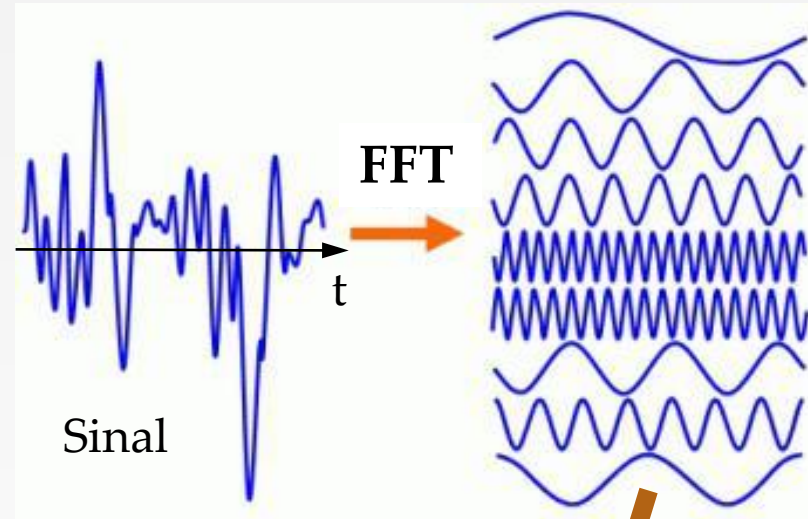


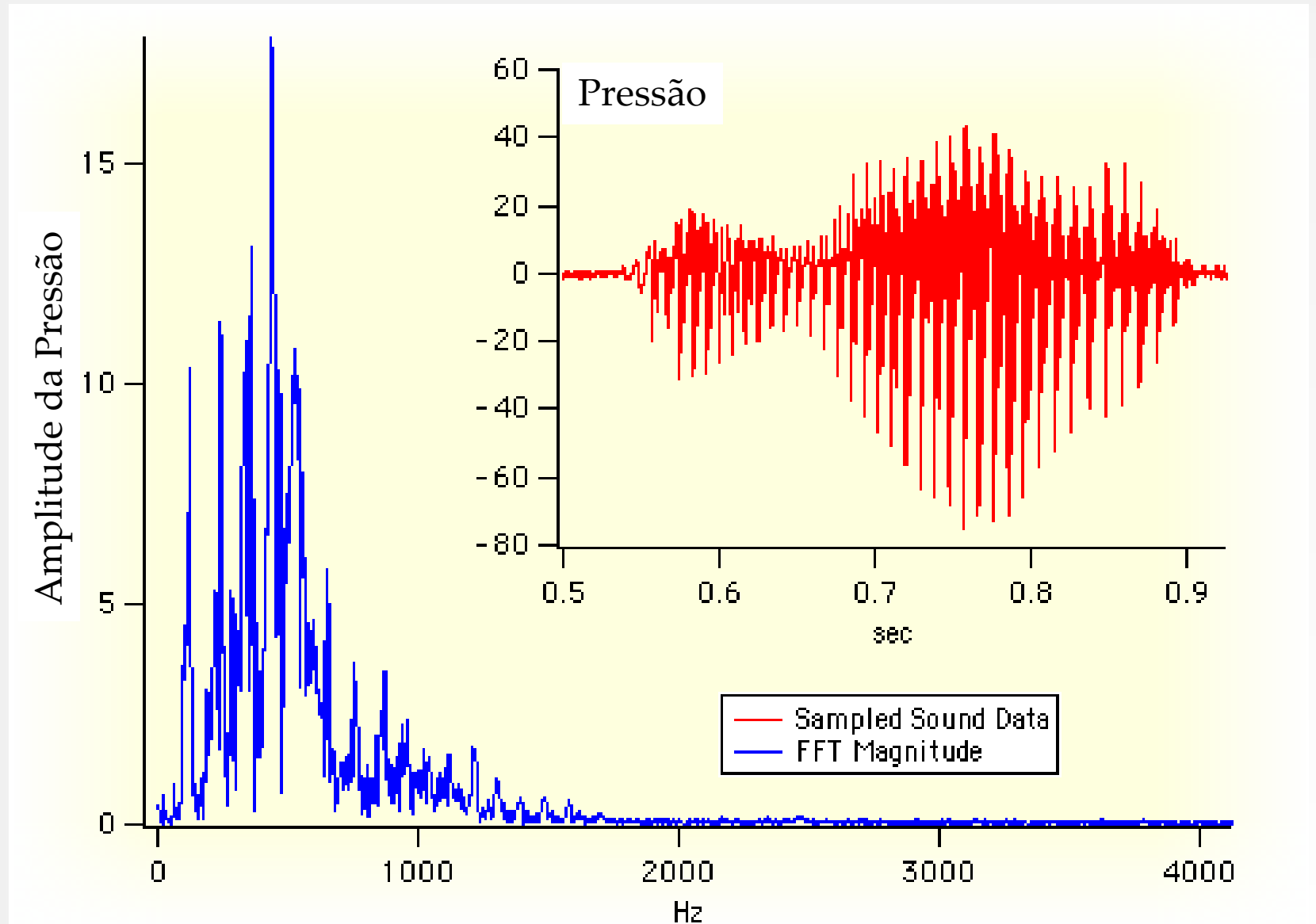
Acústica - Onda Sonora - Frequência - FFT

Capítulo 5

FFT - Fast Fourier Transform

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cdot e^{-\frac{i2\pi}{N}kn}$$
$$= \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cdot \left[\cos\left(\frac{2\pi}{N}kn\right) - i \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{N}kn\right) \right]$$

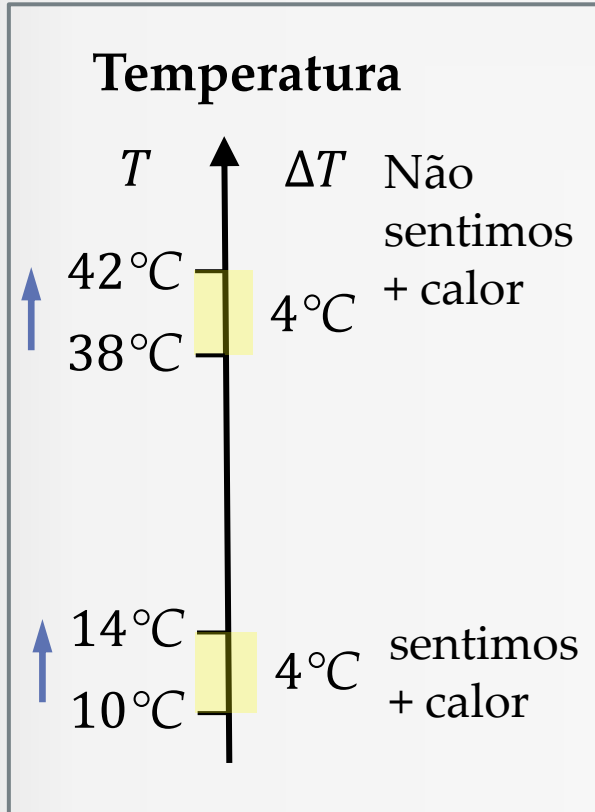






Acústica - Corpo Humano - resposta sensorial

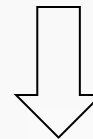
A resposta sensorial do ser humano (R) é proporcional (C) à variação relativa do respetivo estímulo (S).



Matematicamente, isto corresponde a escrever:

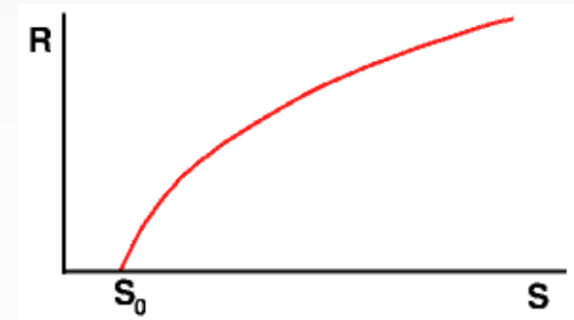
$$\delta R = C \cdot \frac{\delta S}{S}$$

Integrando



$$R = C \cdot \ln \left(\frac{S}{S_0} \right)$$

Lei de Weber-Fechner



Nota: O argumento de um logaritmo tem que ser adimensional. Por isso temos que ter um valor de referência S_0 .



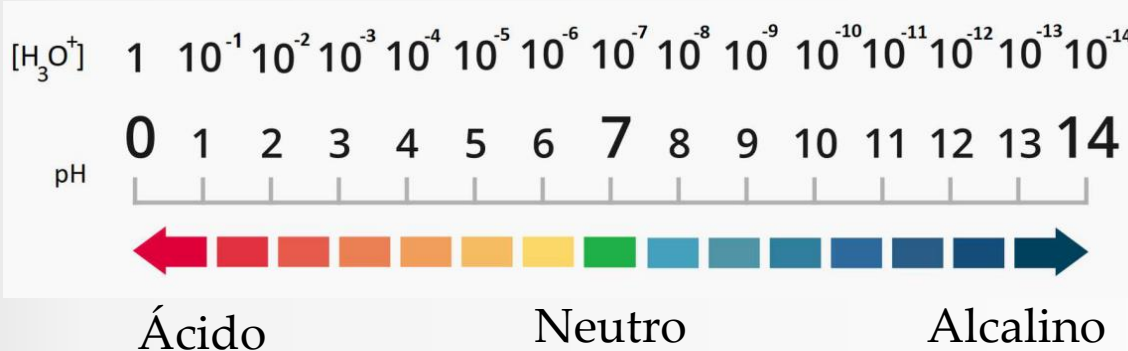
Acústica - Corpo Humano - resposta sensorial

pH – escala para especificar a acidez.

$$pH = -\log_{10} \left(\frac{[H_3O^+]}{S_0} \right)$$

$[H_3O^+]$ - concentração em mol/dm^3

S_0 - $1 mol/dm^3$



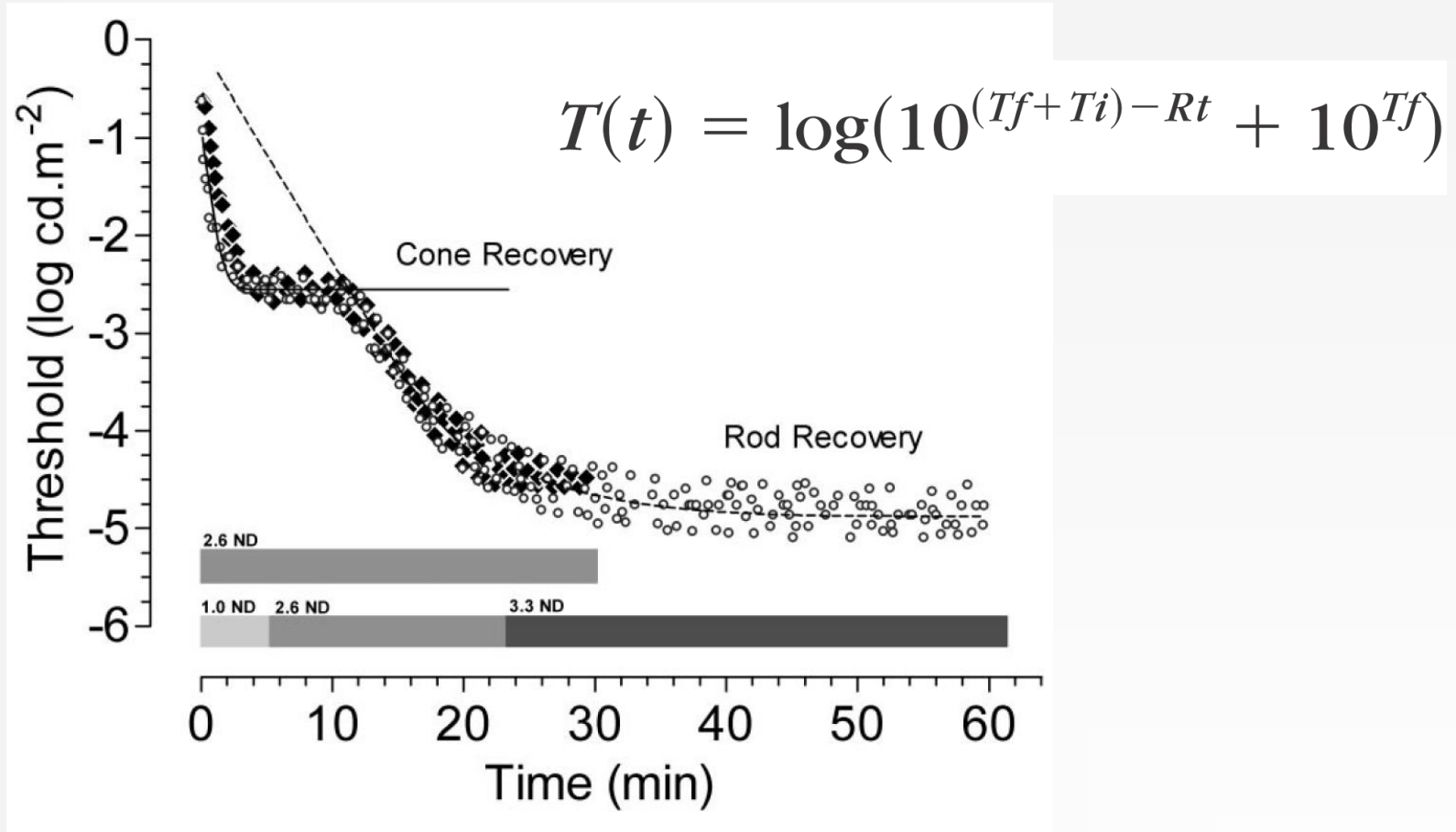
Alguns valores comuns de pH

Substância	pH
Ácido de bateria	<1.0
Suco gástrico	2.0
Sumo de limão	2.4
refrigerante tipo Cola	2.5
Vinagre	2.9
Sumo de laranja ou maçã	3.5
Cerveja	4.5
Café	5.0
Chá	5.5
Chuva ácida	< 5.6
Saliva pacientes com câncer (cancro)	4.5-5.7
Leite	6.5
Água pura	7.0
Saliva humana	6.5-7.4
Sangue	7.34 - 7.45
Água do mar	8.0
Sabonete de mão	9.0 - 10.0
Amônia caseira	11.5
"Água sanitária"	12.5
Hidróxido de sódio caseiro	13.5

Fonte: Definition of pH scales, Pure & App. Chem., Vol. 57, No. 3, pp. 531–542, 1985.



Curva de adaptação ao escuro (olho)



Fonte: Measuring Rod and Cone Dynamics in Age-Related Maculopathy, Investigative Ophthalmology & Visual Science, January 2008, Vol. 49, No. 1

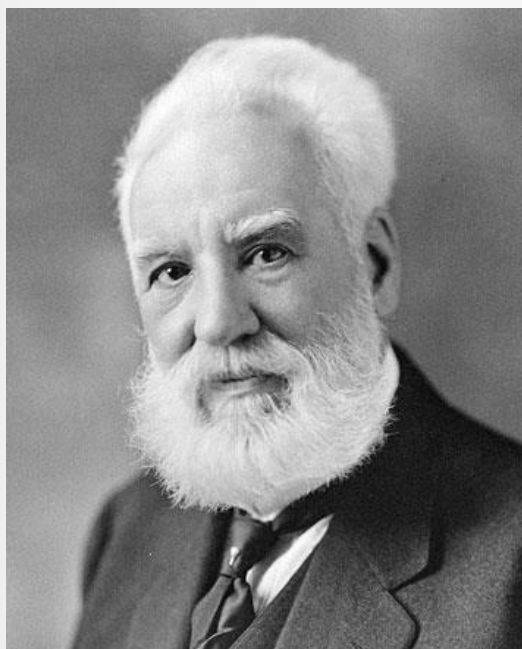


Acústica - Bel (B) - unidade de medida adimensional

Capítulo 5

Vibrações e Ruído

O **Bel** (símbolo: B) é uma unidade de medida adimensional, que compara a quantidade medida (S) a um nível de referência (S_0).
Homenagem ao físico Alexander Graham Bell.



$$\text{Bel}(S) = \log_{10} \left(\frac{S}{S_0} \right) [B]$$

O valor de $1B$ corresponde a um $\frac{S}{S_0} = 10$

A escala bel [B] é geralmente muito comprimida e assim é utilizada a décima parte do bel, **decibel** [dB].

$1 dB = 0,1 B$ ou seja:

$$\text{Bel}(S) = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{S}{S_0} \right) [dB]$$



Nível de pressão sonora (SPL - Sound Pressure Level)

$$L_p = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{p_{rms}^2}{p_0^2} \right) [dB]$$

L_p - Nível de pressão sonora em [dB]

p_{rms} - Pressão sonora eficaz = o *rms* da pressão sonora [Pa]

p_0 - Pressão sonora de referência

$$p_0 = 20 \mu Pa$$

L_p	P_{rms}	$f = 1000Hz$
140 dB	$200 Pa = 20 \cdot 10^7 \mu Pa$	limiar da dor
0 dB	$p_0 = 20 \mu Pa$	limiar de audição

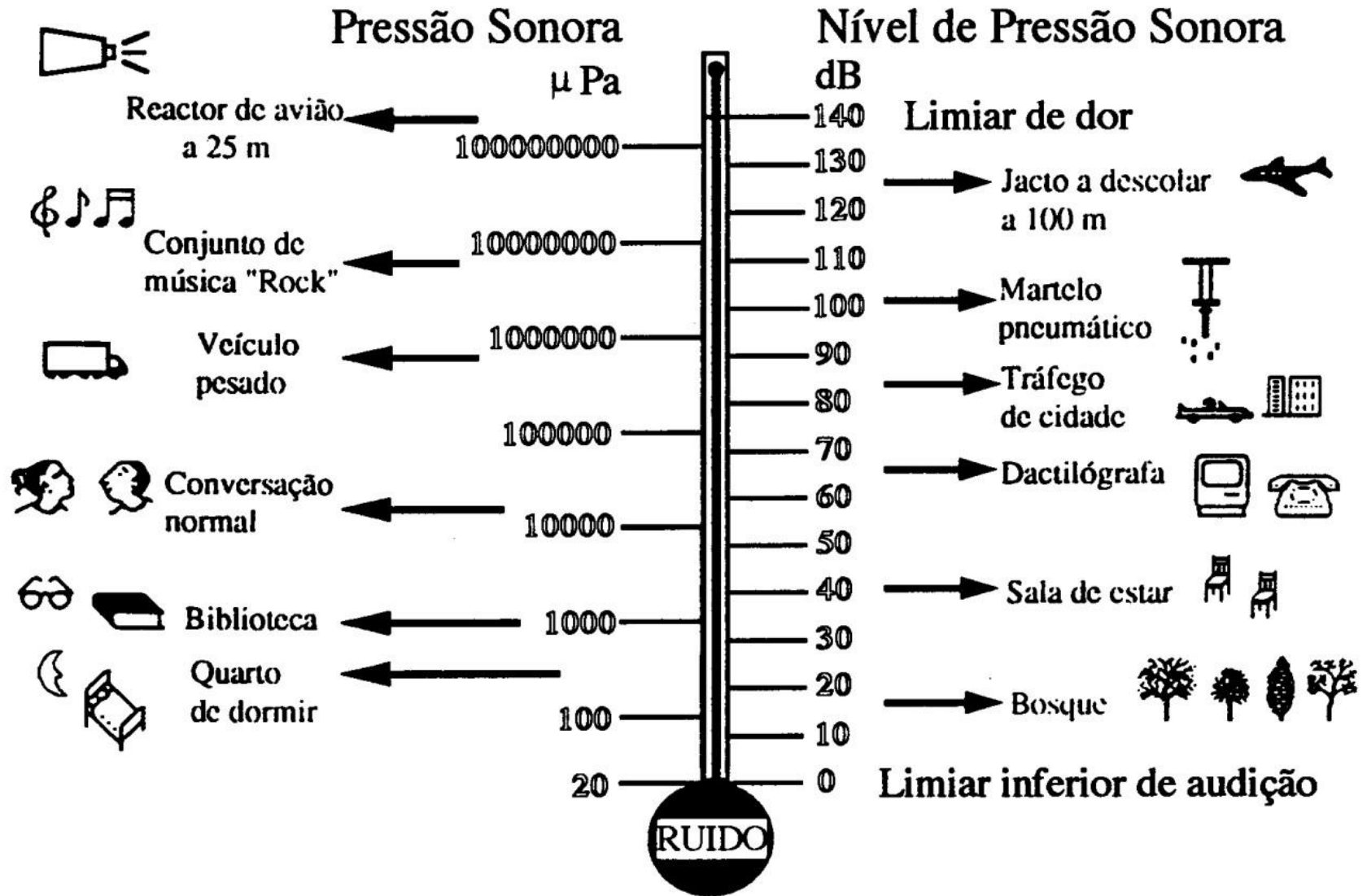
Cada vez que multiplicamos por 10 a P_{rms} temos um aumento de 20 dB

rms - root mean square
raiz da média quadrática

$$x_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} (x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2)}$$



Acústica - (SPL) - Termómetro acústico

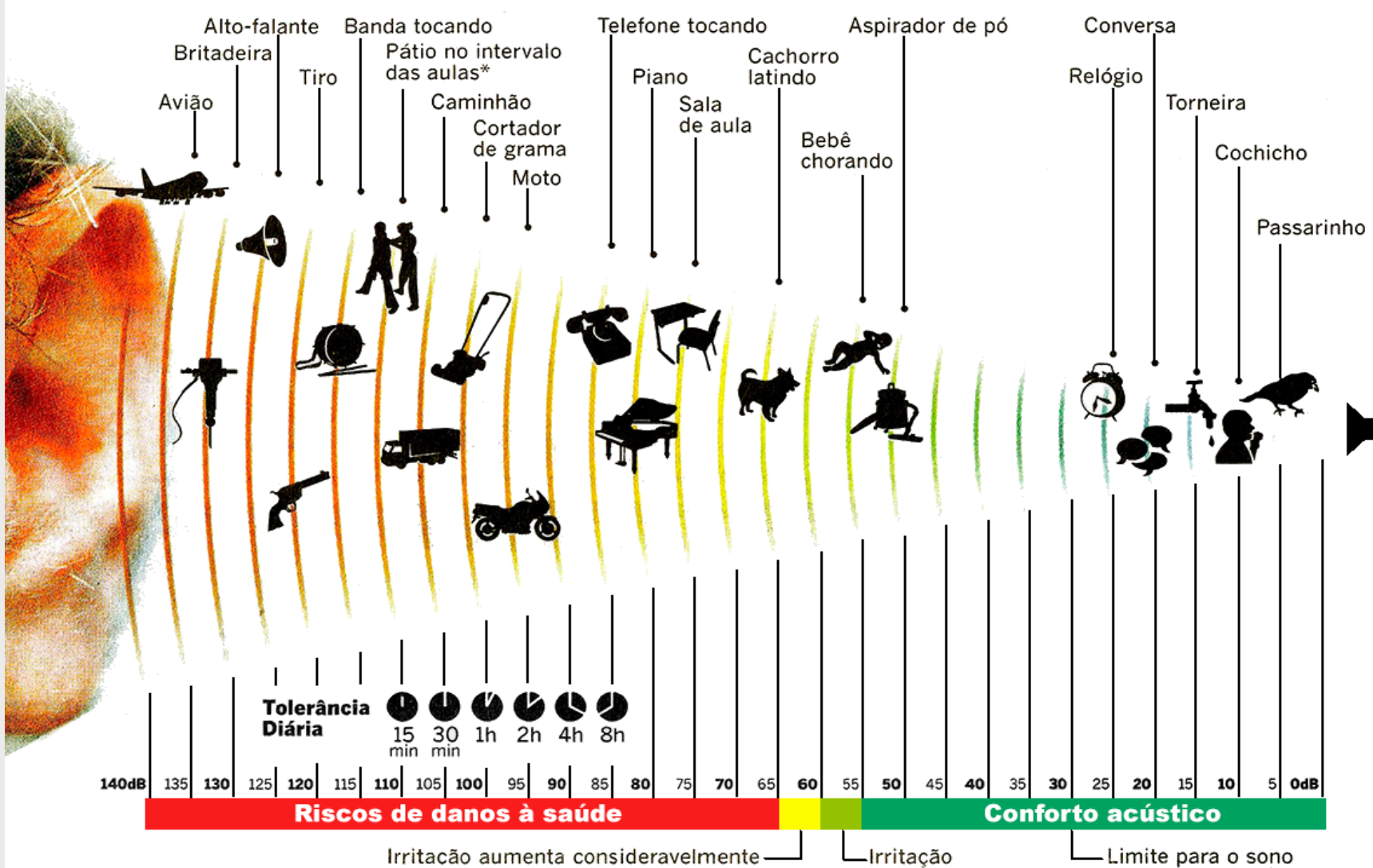


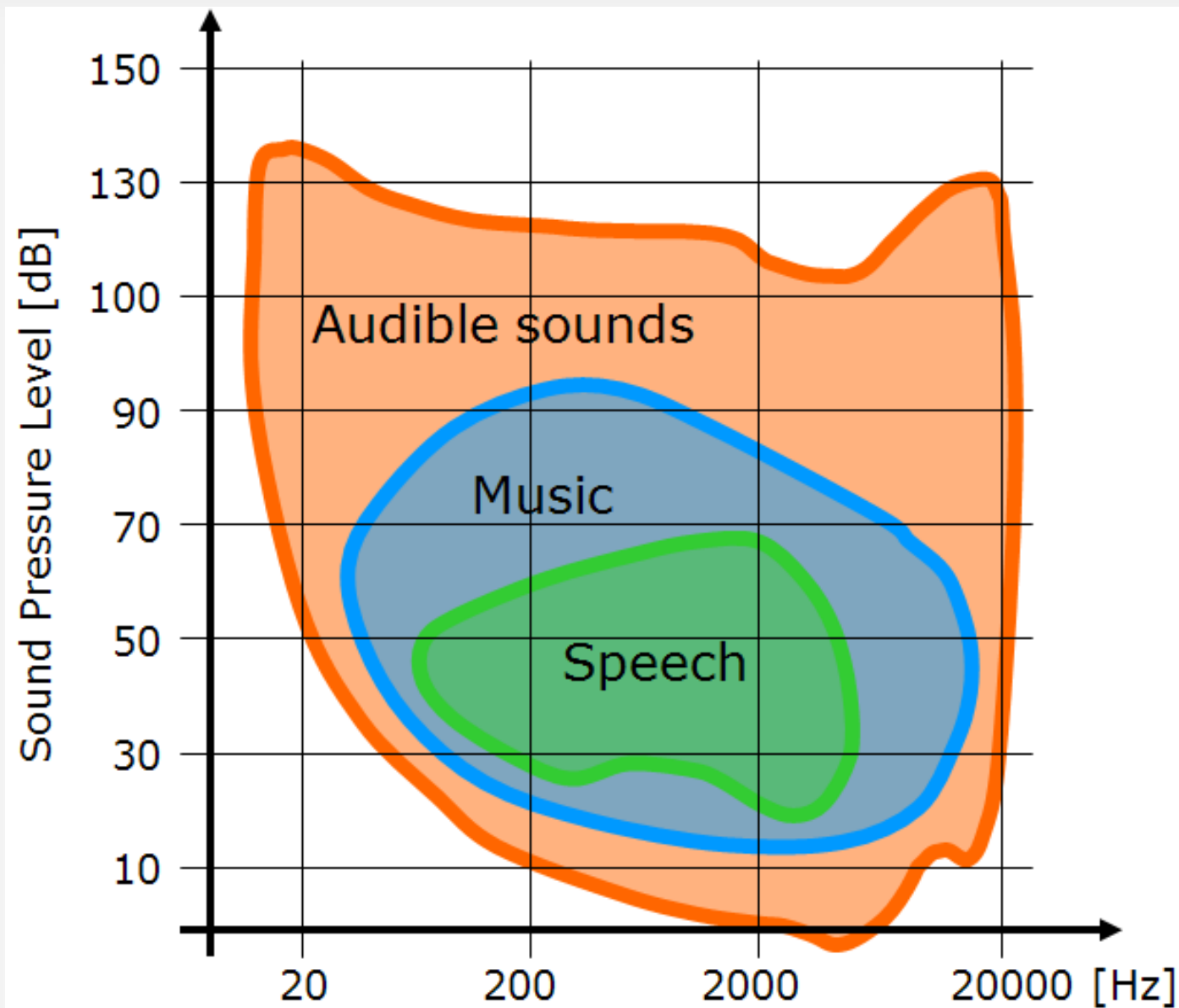


Acústica - (SPL) - Poluição Sonora

De acordo com a OMS, até 55 decibéis é um nível aceitável de ruído

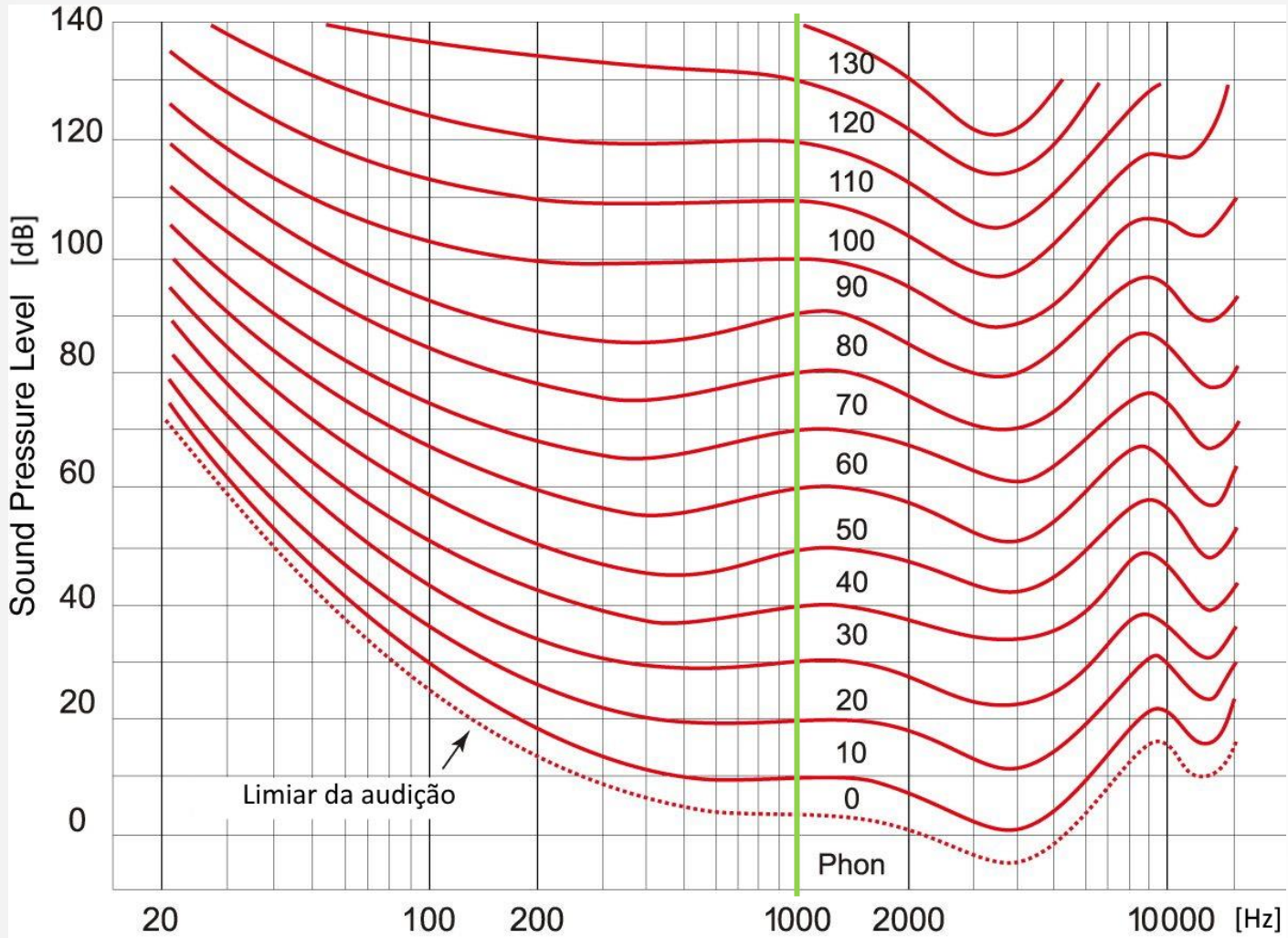
NÍVEIS DE RUÍDO EM DECIBÉIS







Curvas isofónicas

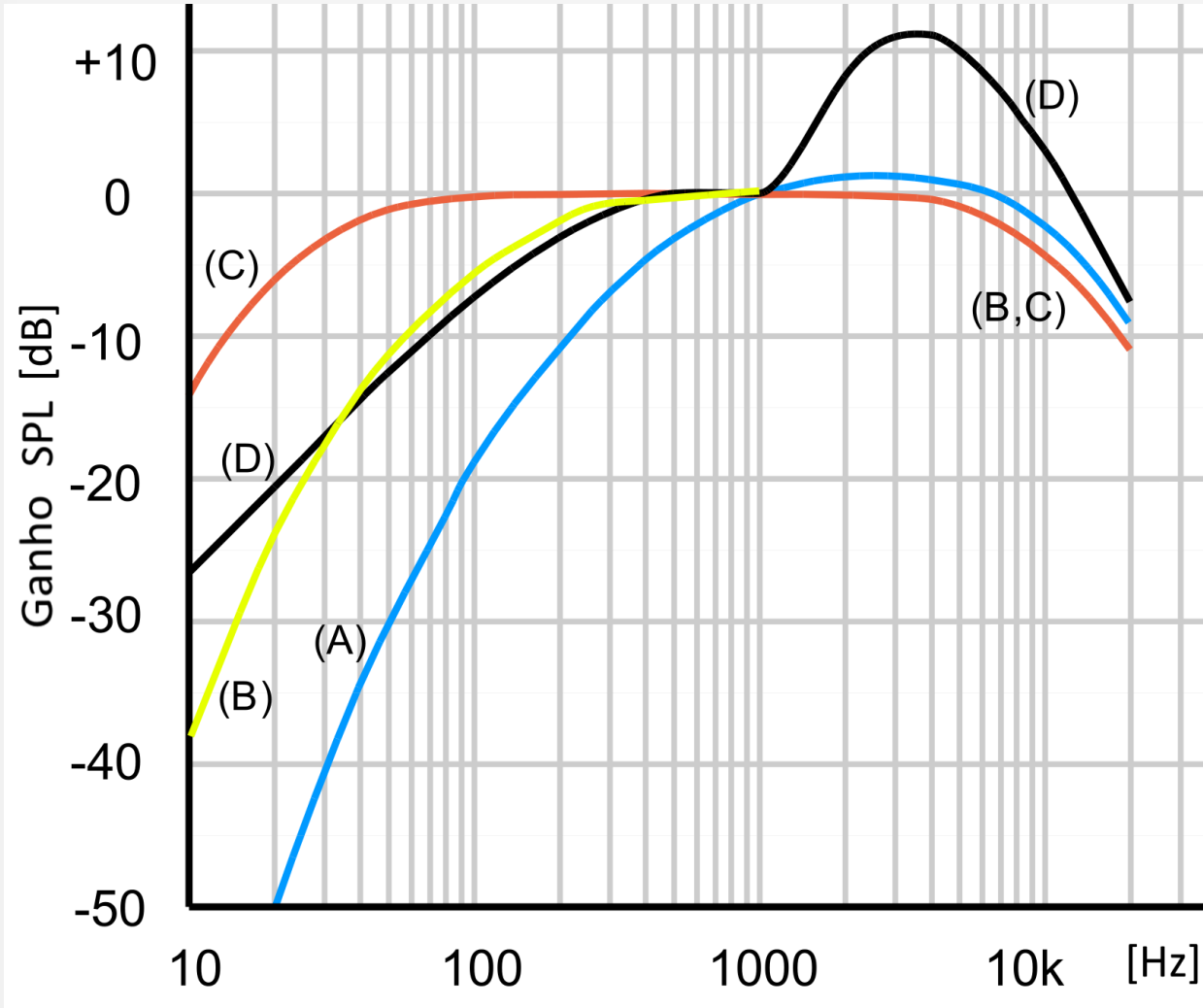


ISO 226:2003 Normal equal-loudness-level contours



Acústica - (SPL) - Filtros de ponderação A, B, C e D

A - é a mais utilizada, representa melhor a resposta do ouvido.
C - é usada para veículos motorizados

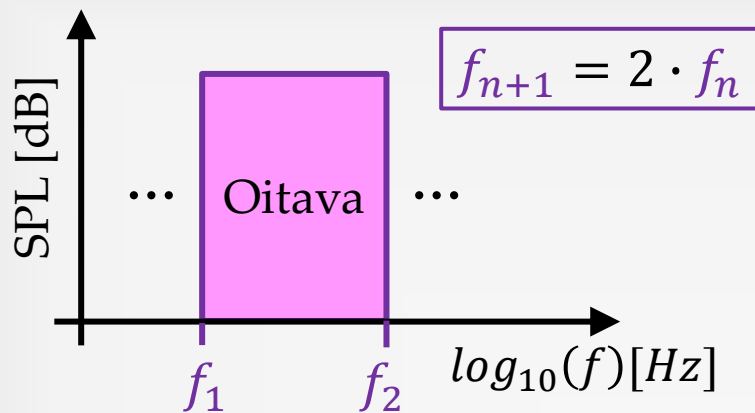


B e D deixaram de ser utilizadas



Acústica - Frequência - Música – Piano moderno

Capítulo 5



Piano moderno com 88 teclas

Cada oitava tem 12 teclas

$$f(i) = 440 \cdot 2^{\frac{i-49}{12}} \text{ [Hz]}$$

$i = 1, 2, 3, \dots, 87, 88$

← Mais grave

Mais agudo →

3^o Oitava 4^o Oitava 5^o Oitava

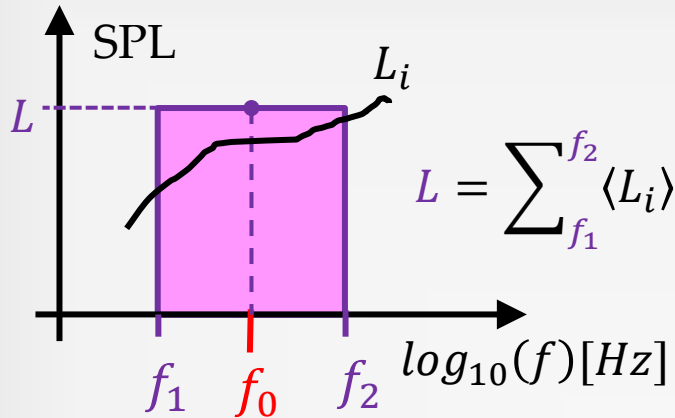
E 164.8	F 174.6	G 196	A 220	B 247	C 261.6	D 293.7	E 329.6	F 349.2	G 392	A 440	B 493.9	C 523.3	D 587.4	E 659.4	F 698.7	G 784.3	A 880			
Dó	Ré	Mi	Fá	Sol	Lá	Si	Dó	Ré	Mi	Fá	Sol	Lá	Si	Dó	Ré	Mi	Fá	Sol	Lá	Si
i : 28	30	32	33	35	37	39	40	42	44	45	47	49	51	52	54	56	57	59	61	62



Diapasão emite um tom a 440 Hz



Acústica - Frequência - Filtros de Bandas



f_2 - frequência limite superior
 f_0 - frequência central (referência)
 f_1 - frequência limite inferior

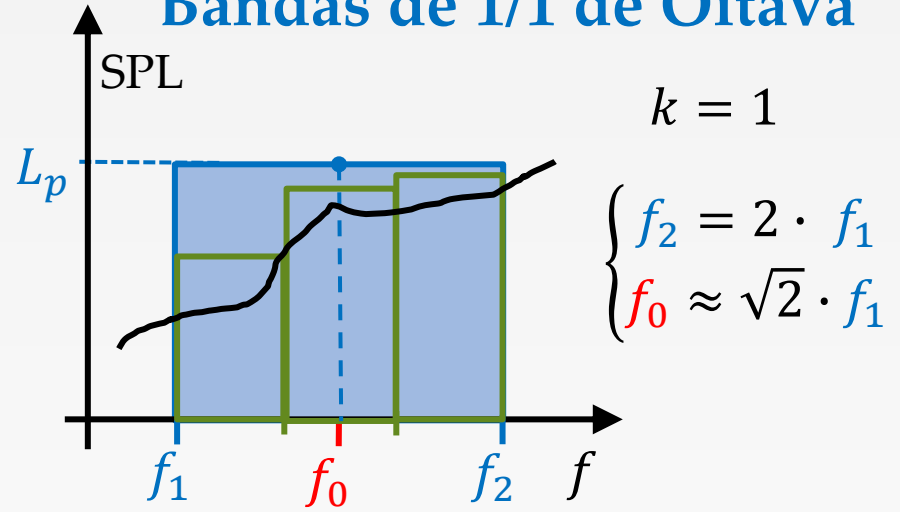
Bandas

$$f_{n+1} = 2^k \cdot f_n$$

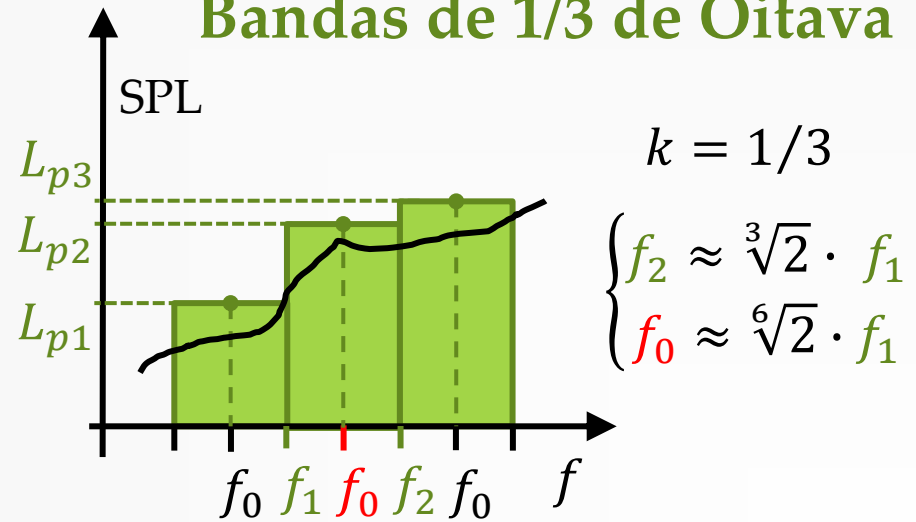
$$f_0 \approx \sqrt{2^k} \cdot f_n$$

$$L_p = \langle L_{p1} \rangle + \langle L_{p2} \rangle + \langle L_{p3} \rangle$$

Bandas de 1/1 de Oitava



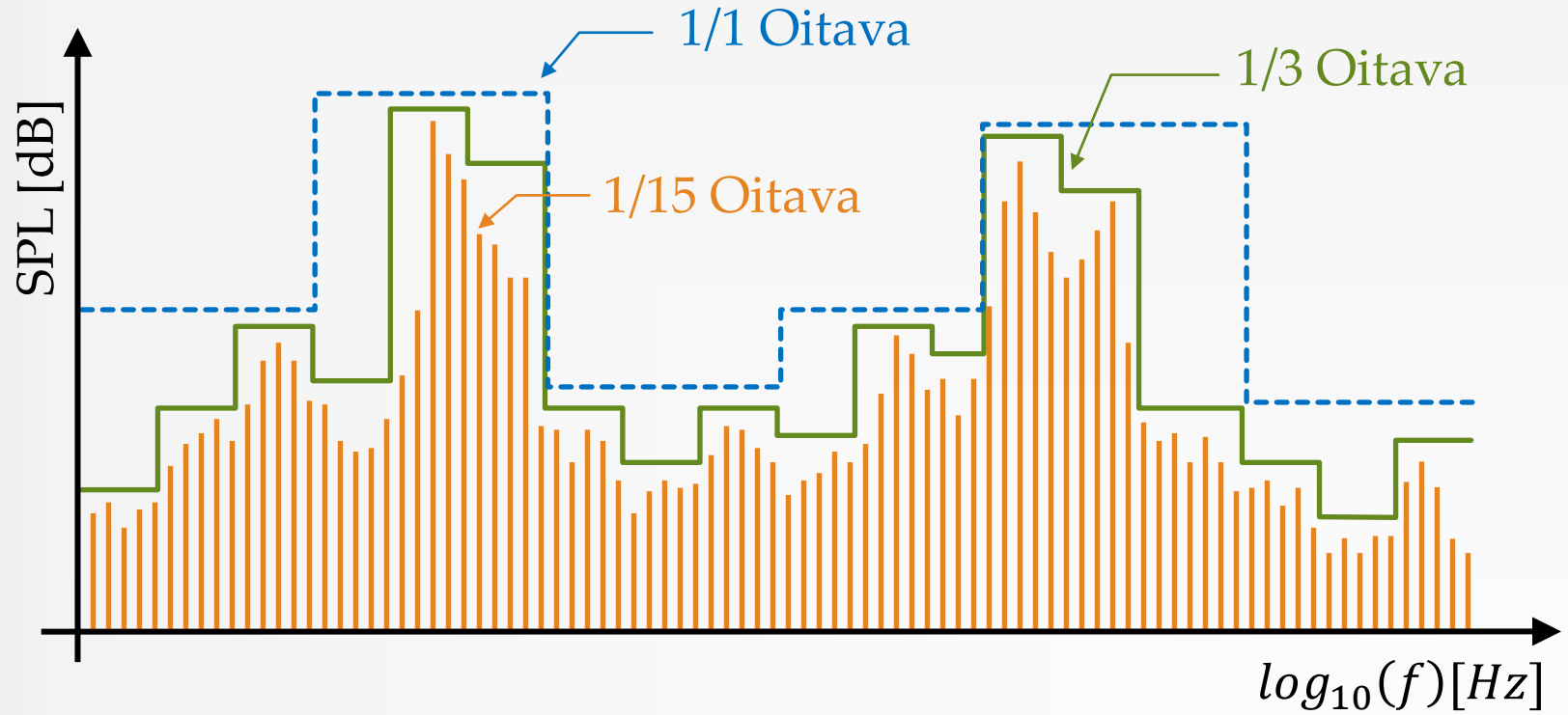
Bandas de 1/3 de Oitava





Acústica - Frequência - Filtros de Bandas - Centros

Band number x	Base-ten exact f_0 ($10^{x/10}$), Hz	Base-two exact f_0 ($2^{(x-30)/3}$)(1000), Hz	Nominal midband frequency, Hz	Octave Band			1/3 Octave Band		
				Lower Frequency f_1 (Hz)	Center Frequency f_0 (Hz)	Upper Frequency f_2 (Hz)	Lower Frequency f_1 (Hz)	Center Frequency f_0 (Hz)	Upper Frequency f_2 (Hz)
14	25.119	24.803	25				22.4	25	28.2
15	31.623	31.250†	31.5	22	31.5	44	28.2	31.5	35.5
16	39.811	39.373	40				35.5	40	44.7
17	50.119	49.606	50				44.7	50	56.2
18	63.096	62.500†	63	44	63	88	56.2	63	70.8
19	79.433	78.745	80				70.8	80	89.1
20	100.00†	99.213	100				89.1	100	112
21	125.89	125.00†	125	88	125	177	112	125	141
22	158.49	157.49	160				141	160	178
23	199.53	198.43	200				178	200	224
24	251.19	250.00†	250	177	250	355	224	250	282
25	316.23	314.98	315				282	315	355
26	398.11	396.85	400				355	400	447
27	501.19	500.00†	500	355	500	710	447	500	562
28	630.96	629.96	630				562	630	708
29	794.33	793.70	800				708	800	891
30	1,000.0†	1,000.0†	1 000	710	1,000	1,420	891	1,000	1,122
31	1,258.9	1,259.9	1 250				1,122	1,250	1,413
32	1,584.9	1,587.4	1 600				1,413	1,600	1,778
33	1,995.3	2,000.0†	2 000	1,420	2,000	2,840	1,778	2,000	2,239
34	2,511.9	2,519.8	2 500				2,239	2,500	2,818
35	3,162.3	3,174.8	3 150				2,818	3,150	3,548
36	3,981.1	4,000.0†	4 000	2,840	4,000	5,680	3,548	4,000	4,467
37	5,011.9	5,039.7	5 000				4,467	5,000	5,623
38	6,309.6	6,349.6	6 300				5,623	6,300	7,079
39	7,943.3	8,000.0†	8 000	5,680	8,000	11,360	7,079	8,000	8,913
40	10,000†	10,079	10 000				8,913	10,000	11,220
41	12,589	12,699	12 500				11,220	12,500	14,130
42	15,849	16,000†	16 000	11,360	16,000	22,720	14,130	16,000	17,780
43	19,953	20,159	20 000				17,780	20,000	22,390



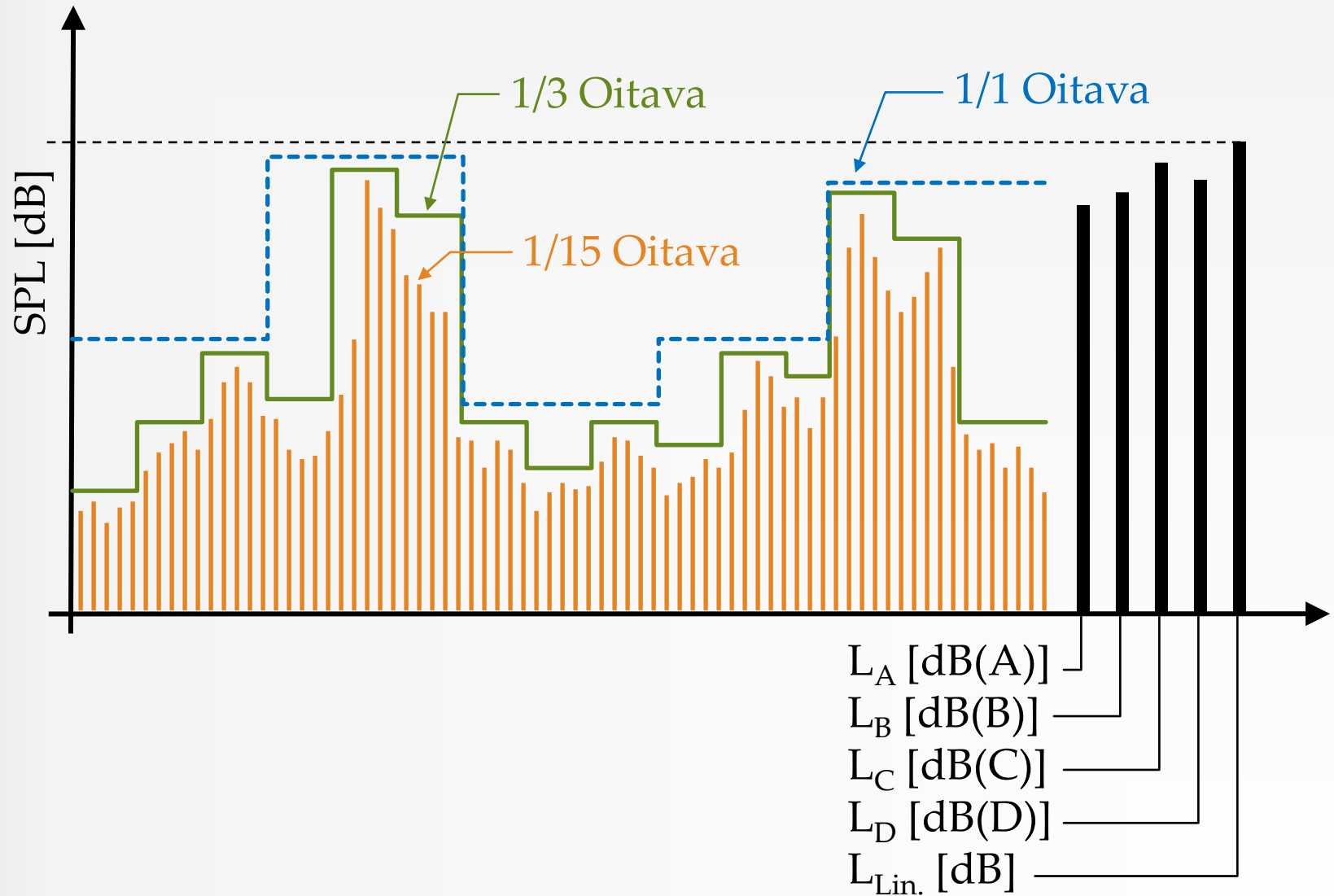


Acústica - (SPL) - Filtros de ponderação A, B, C e D

Filtros para as bandas de 1/1 e 1/3 de oitava

Frequency (Hz)	A-Weighting (dB)	B-Weighting (dB)	C-Weighting (dB)
12.5	-63.4	-33.2	-11.2
16	-56.7	-28.5	-8.5
20	-50.5	-24.2	-6.2
25	-44.7	-20.4	-4.4
31.5	-39.4	-17.1	-3.0
40	-34.6	-14.2	-2.0
50	-30.2	-11.6	-1.3
63	-26.2	-9.3	-0.8
80	-22.5	-7.4	-0.5
100	-19.1	-5.6	-0.3
125	-16.1	-4.2	-0.2
160	-13.4	-3.0	-0.1
200	-10.9	-2.0	0
250	-8.6	-1.3	0
315	-6.6	-0.8	0

Frequency (Hz)	A-Weighting (dB)	B-Weighting (dB)	C-Weighting (dB)
400	-4.8	-0.5	0
500	-3.2	-0.3	0
630	-1.9	-0.1	0
800	-0.8	0	0
1000	0	0	0
1250	+0.6	0	0
1600	+1.0	0	-0.1
2000	+1.2	-0.1	-0.2
2500	+1.3	-0.2	-0.3
3150	+1.2	-0.4	-0.5
4000	+1.0	-0.7	-0.8
5000	+0.5	-1.2	-1.3
6300	-0.1	-1.9	-2.0
8000	-1.1	-2.9	-3.0
10 000	-2.5	-4.3	-4.4
12 500	-4.3	-6.1	-6.2
16 000	-6.6	-8.4	-8.5
20 000	-9.3	-11.1	-11.2





Acústica - Intensidade Acústica (I) e Potência Acústica (W)

Intensidade Acústica (I): Medida da direção do fluxo de energia acústica ou Fluxo de energia sonora por unidade de tempo ou Potência por unidade de área.

$$\vec{I} = p \cdot \vec{c} = \frac{\text{Força}}{\text{Área}} \cdot \frac{\text{Distância}}{\text{tempo}} = \frac{\text{Energia}}{\text{Área} \cdot \text{tempo}} = \frac{\text{Potência (W)}}{\text{Área}}$$

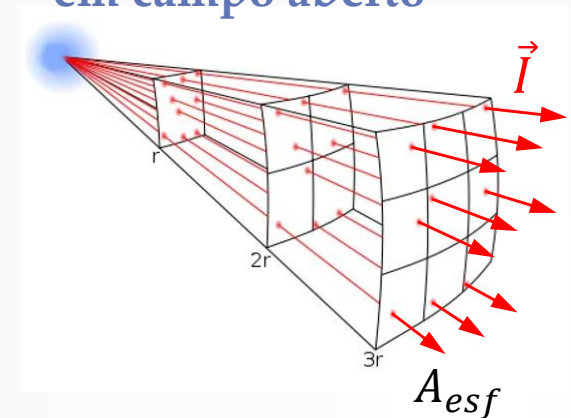
Podemos escrever a impedância acústica num ponto (Z) de 2 formas:

$$\left. \begin{matrix} Z = \frac{p}{c} \\ Z = \rho c \end{matrix} \right\} \Rightarrow \left. \begin{matrix} c = \frac{p}{\rho c} \\ I = p \cdot c \end{matrix} \right\} \Rightarrow I = \frac{p_{rms}^2}{\rho c}$$

$$\left\{ \begin{matrix} \rho = 1,21 \text{ kg/m}^3 \\ c = 340 \text{ m/s} \\ \text{ar a } 20^\circ\text{C e à } p_{atm} \end{matrix} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{matrix} \rho c = 411 \text{ Ns/m}^3 \\ 1\text{Rayl} = 1 \text{ Ns/m}^3 \end{matrix} \right.$$

$$I = \frac{W}{A(r)} \quad [W/m^2]$$

Fonte sonora pontual em campo aberto





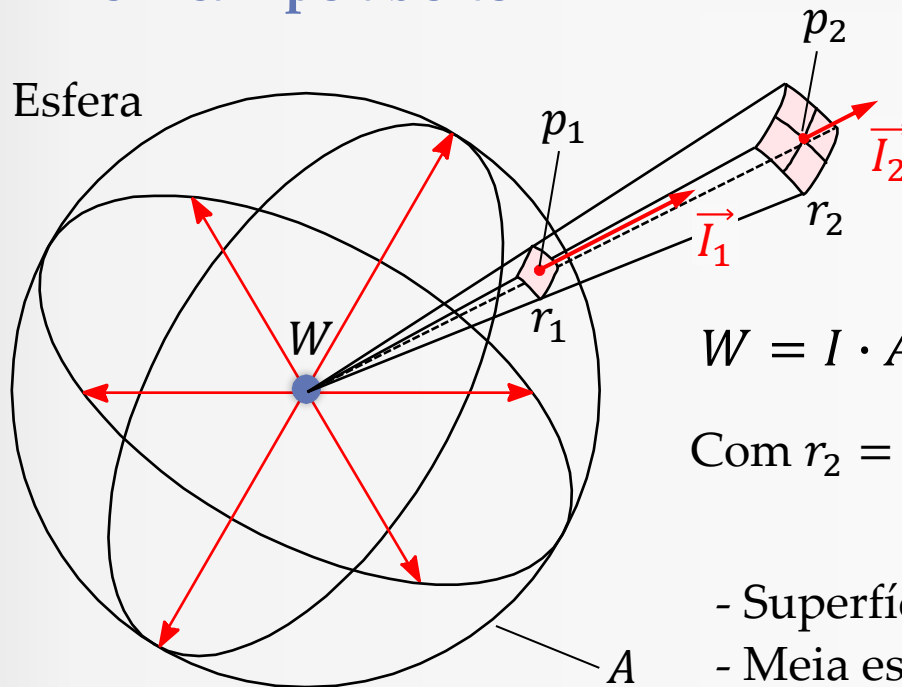
Acústica - Intensidade Acústica (I) e Potência Acústica (W)

Potência Acústica (W): Energia total emitida por uma fonte por unidade de tempo.

A potência acústica de uma fonte emitindo em campo aberto pode ser determinada adicionando toda a energia que atravessa a superfície imaginária de uma esfera que envolva a fonte.

- Fonte sonora pontual em campo aberto

$$W = \oint_A \vec{I} \cdot \vec{n} dA = I \cdot A$$



$$W = I \cdot A_{esf}(r) \quad A_2 = 4A_1 \Rightarrow \begin{cases} I_2 = \frac{I_1}{4} \\ p_2 = \frac{p_1}{16} \end{cases}$$

Com $r_2 = 2r_1$ temos

- Superfície esférica: $A(r) = A_{esf}(r) = 4\pi r^2$
- Meia esférica (chão refletor): $A(r) = 2\pi r^2$



Nível de intensidade sonora

$$L_I = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{I}{I_0} \right) [dB]$$

L_I - Nível de intensidade sonora em [dB]

I - Intensidade sonora [W/m^2]

I_0 - Intensidade sonora de referência [W/m^2]

$$I_0 = \frac{p_0^2}{\rho c} \approx 10^{-12} W/m^2$$

$L_I = L_p$	I	p_{rms}
140 dB	100 W/m^2	$20 \cdot 10^7 \mu Pa = 200 Pa$
0 dB	$I_0 \approx 10^{-12} W/m^2$	$p_0 = 20 \mu Pa$

$$\left. \begin{array}{l} I = \frac{p_{rms}^2}{\rho c} \\ I_0 = \frac{p_0^2}{\rho c} \end{array} \right\} \Rightarrow \left(\frac{I}{I_0} \right) = \frac{p_{rms}^2 \rho c}{\rho c p_0^2} = \left(\frac{p_{rms}}{p_0} \right)^2 \Rightarrow L_I = L_p$$



Nível de potência sonora

$$L_W = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{W}{W_0} \right) [dB] (re 10^{-12} W)$$

L_W - Nível de potência sonora em [dB]

W - Potência sonora [W]

W_0 - Potência sonora de referência [W]

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

$$W_0 = I_0 \cdot A_0 \quad A_0 = 1m^2$$

L_W	W
140 dB	100 W
0 dB	$W_0 \approx 10^{-12} W$

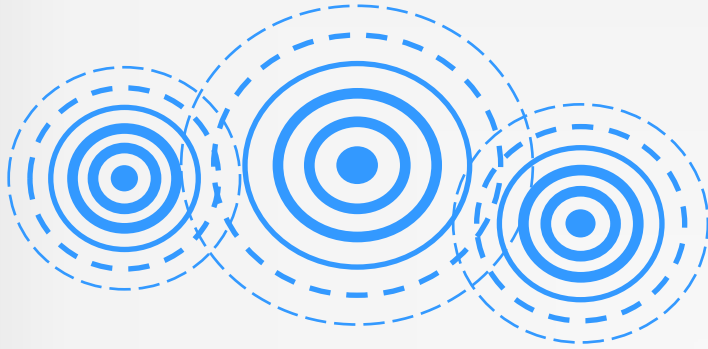
$$W_0 \approx 10^{-12} W$$

$$L_W = 10 \cdot \log_{10}(W) + 120 [dB] (re 10^{-12} W)$$



Acústica - Adição de pressões sonoras

Para calcular o nível de pressão sonora de N fontes somadas, temos que somar as respectivas intensidades.



$$I_{Total} = \sum_{i=1}^N I_i$$

Nível de pressão sonora de N fontes somadas diferentes:

$$L_{pTotal} = 10 \cdot \log_{10} \left(\sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_{pi}}{10}} \right)$$

Nível de pressão sonora de N fontes somadas iguais:

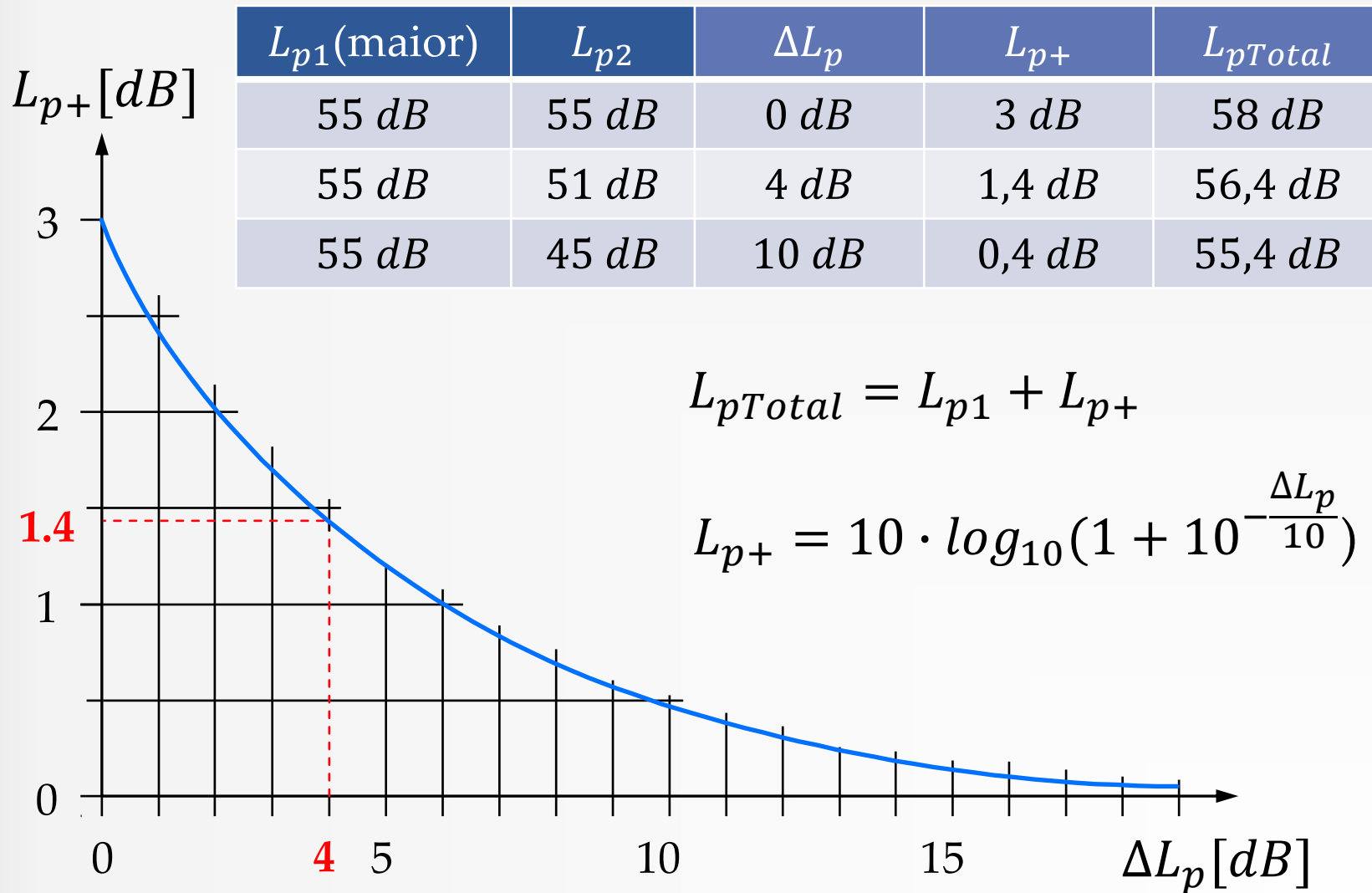
$$L_{pTotal} = L_{p1} + 10 \cdot \log_{10}(N)$$



Acústica - Adição de 2 pressões sonoras

Capítulo 5

Vibrações e Ruído





Acústica – Propagação do Som

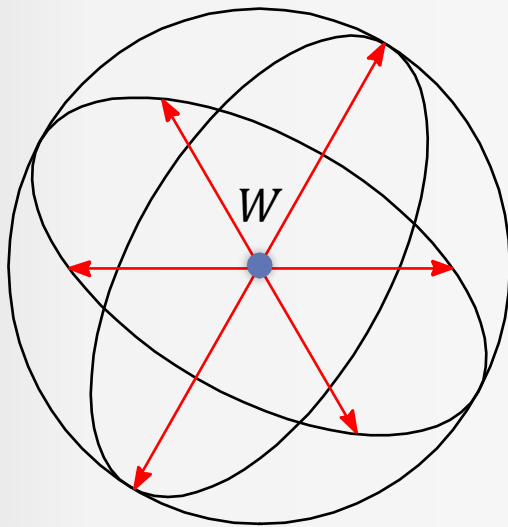
Capítulo 5

Vibrações e Ruído

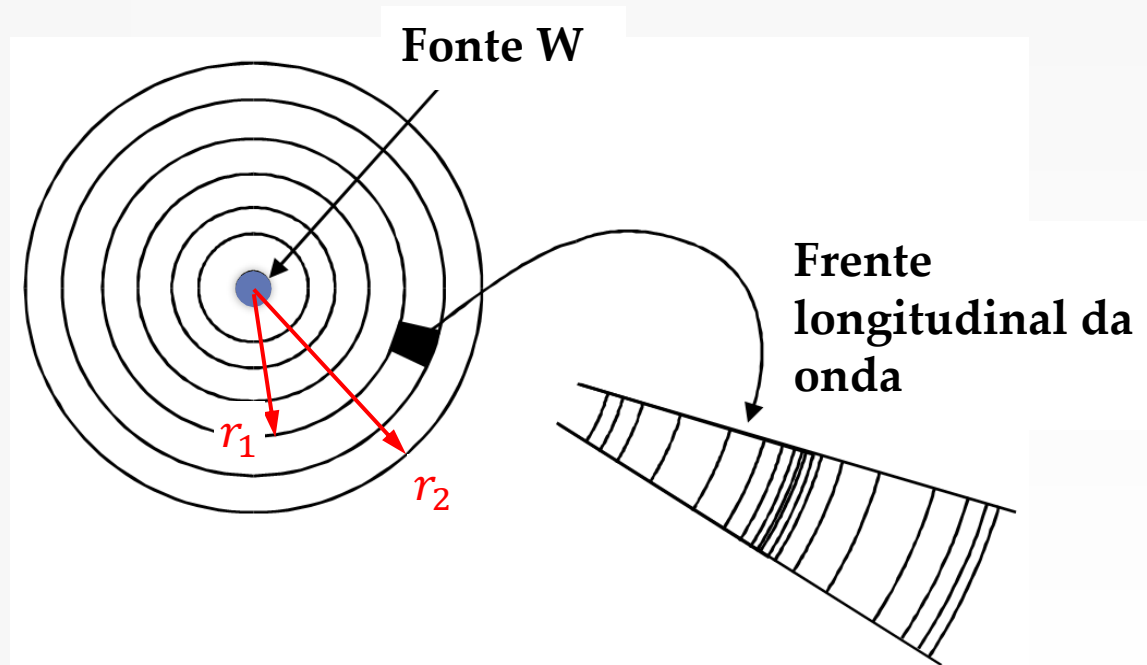
Considerando a forma mais simples de uma Fonte Sonora, que emite ondas sonoras iguais em todas as direções a partir de um ponto, a energia emitida num determinado tempo difundir-se-á em todas as direções e, um segundo depois, estará distribuída na superfície esférica situada a cerca de 340 m (no ar) de raio.

Este tipo de **propagação** designa-se de **esférica**.

- Fonte sonora pontual em campo aberto



Superfície esférica





Acústica – Propagação do Som

Capítulo 5

Como o nível de pressão sonora é igual ao nível de intensidade sonora e com a definição de intensidade sonora. Podemos escrever:

$$L_p = L_W - 10 \cdot \log_{10}(A(r))$$

A medição do valor da potência sonora, L_W , é usualmente complicada na prática. Contudo, se o nível de pressão sonora (L_{p1}) for medido a **uma distância de referência $r_1 > 1$ m** (para evitar fenômenos de proximidade da fonte que complicam o campo acústico), então o nível de pressão sonora a uma outra distância r_2 pode ser estimado por:

$$L_{p2} = L_{p1} - 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{A(r_2)}{A(r_1)} \right)$$

Fonte Pontual - Superfície esférica: $A(r) = A_{esf}(r) = 4\pi r^2$

Fonte Linear - Superfície cilíndrica: $A(r) = A_{cil}(r) = 2\pi rL$



Acústica – Nível de Pressão Sonora Contínua Equivalente

Capítulo 5

Quando uma pessoa está exposta a um ruído ao longo de um período longo de tempo, é necessário avaliar a energia sonora recebida.

Nível de Pressão Sonora Contínua Equivalente

$$L_{eq} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{p(t)}{p_0} \right)^2 dt \right)$$

Da forma discreta

$$L_{eq} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{1}{T} \sum_{i=1}^N \Delta T_i \cdot 10^{\frac{L_{pi}}{10}} \right)$$



Acústica – Nível de Pressão Sonora Contínua Equivalente

Capítulo 5

Vibrações e Ruído

