

Medidas da Onda Sonora

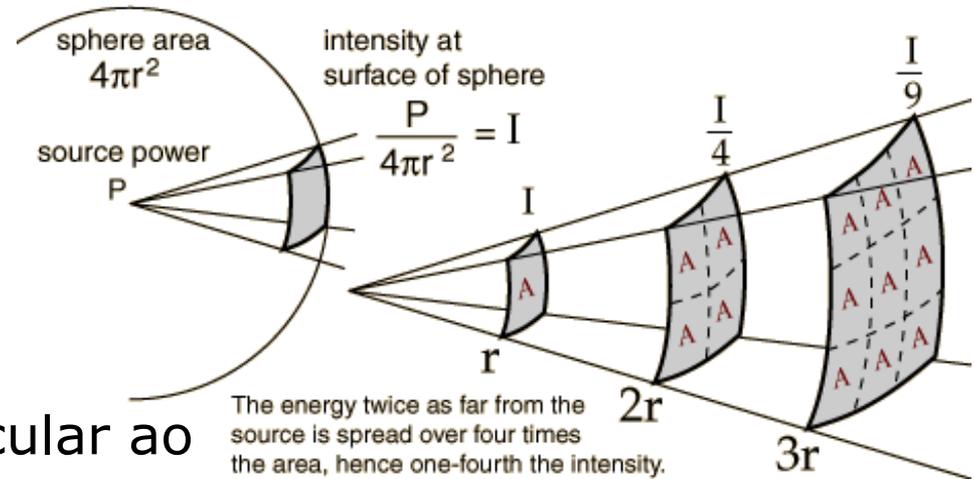
▪ **Prof. Theo Z. Pavan**

Física Acústica

Aula 8

Energia transportada pelas ondas

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



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

- A energia é proporcional à amplitude ao quadrado:

$$I \propto A^2$$

Intensidade do som

- Ao utilizar a energia para medir a intensidade do som, deve-se observar a potência sonora, onde potência [1 Watt=1 J/s] é trabalho em função do tempo. A Intensidade sonora é estabelecida pela potência aplicada em uma determinada área, no sistema SI $[I]=W.m^{-2}$ e no sistema CGS $[I]= erg.cm^{-2}.s^{-1}$
- Quando utilizamos a pressão para medir a intensidade do som, a unidade de medida no SI é o Pascal [1 Pa= 1 N*m⁻²] e no sistema CGS a pressão é dada em [dyna*cm⁻²].

Níveis sonoros

FONTES DE RUÍDO	Intensidade (Watt/m ²)	dB
 limite da dor	10^2	140
 jato	10^0	120
 concerto de rock		
 britadeira	10^{-2}	100
 pequenos caminhões acelerando	10^{-4}	80
 via movimentada		
 barulho de escritório	10^{-6}	60
 escritório		
 privado	10^{-8}	40
 residencial		
 estúdio de rádio operando	10^{-10}	20
 cochichar		
 limite da audição	10^{-12}	0

Limiar auditivo

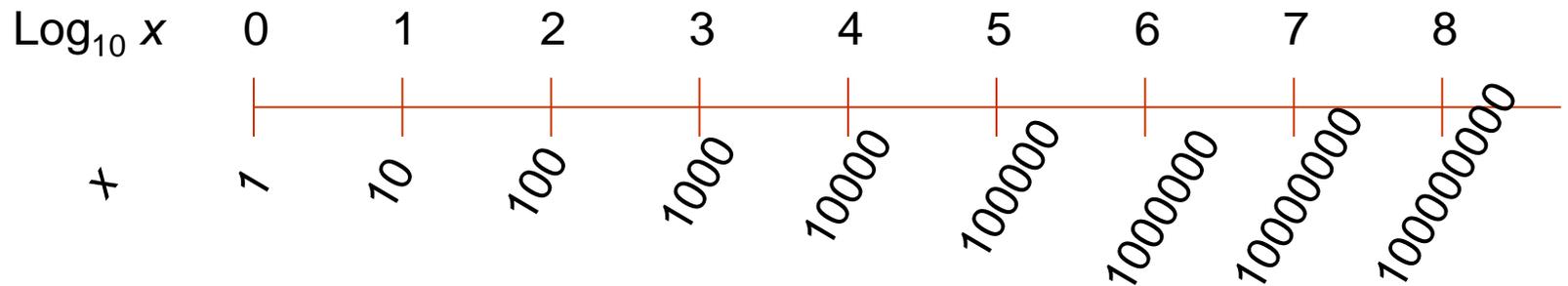
- O sistema auditivo do ser humano é muito sensível e está preparado para receber sons de intensidades muito baixas, da ordem de 10^{-12} W/m² (ou seja, 0,0000000000001 W/m²) até intensidades tão altas quanto 100 W/m².

Logaritmos

- Logaritmo de um número é o expoente a que se deve elevar a base adotada para se obter esse número:

$$a^x = n \Rightarrow \log_a n = x$$

$$10^3 = 1000 \Rightarrow \log_{10} 1000 = 3$$



Logaritmos

$$a^x = n \quad \Rightarrow \quad \log_a n = x$$

- a é a base
- x é o expoente
- Normalmente vamos trabalhar com a base 10, e portanto, para simplificar, não a escreveremos no logaritmo.

Logaritmos

- Regras Básicas [revisão :-)]

$$\log ab = \log a + \log b$$

$$\log 6 = \log 3 \times 2 = \log 3 + \log 2 = 0,4771 + 0,3010 = 0,7781$$

(1)

$$\log \frac{a}{b} = \log a - \log b$$

$$\log 1,5 = \log \frac{3}{2} = \log 3 - \log 2 = 0,4771 - 0,3010 = 0,1761$$

(2)

Logaritmos

- Regras Básicas [revisão :-)]

$$\log a^b = b \log a$$

$$\log 4 = \log 2^2 = 2 \log 2 = 2 \times 0.3010 = 0,6020$$

(3)

$$\log \frac{1}{b} = -\log a$$

$$\log 0,5 = \log \frac{1}{2} = -0,3010$$

(4)

Bel

- Criado por conveniência, para expressar a razão de dois números com diferenças grandes.
- Homenagem ao cientista Alexander Graham Bell, inventor, entre outras, do telefone.
- Se a e b são dois níveis de potência, então a razão *bel* é: $Nível\ de\ Potência = \log_{10} (a/b)$ [Bel].

Nível de Potência = $\log_{10} (a/b)$ [Bel]

Ex: Se **a tem o dobro** da potência de **b** então:

$$\text{Nível de Potência} = \log_{10} 2 = .301 \text{ Bel}$$

Ex: Se **a tem a metade** da potência de **b** então:

$$\text{Nível de Potência} = \log_{10} 0.5 = -0.301 \text{ Bel}$$

Decibel: Introdução

- Segundo a Lei de Fechner e Weber, a sensação (S) de um indivíduo a um estímulo sonoro é proporcional ao logaritmo do estímulo (E), multiplicado por uma constante (K), ou seja:

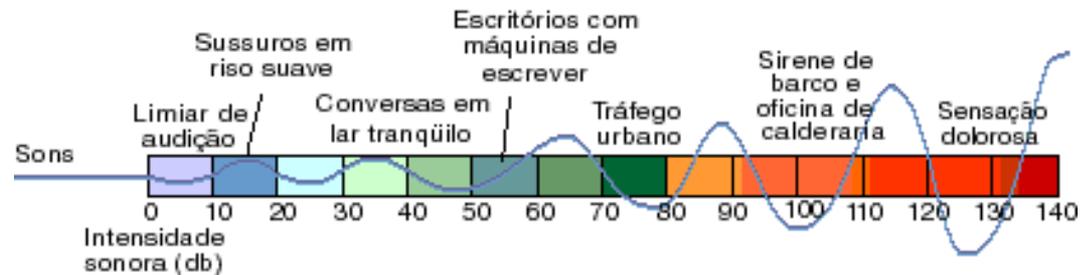
$$S = K \log E/E_{\text{ref}}$$

onde: S : Sensação auditiva

K : Constante de proporcionalidade

E : Estímulo

E_{ref} : Estímulo de referência



Nível de Intensidade Sonora (NIS)

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

$$S = K \log E/E_{\text{ref}}$$

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 por um indivíduo otologicamente normal e utilizando-se $K=10$, temos:

$$\text{NIS} = 10 \log (I / I_0)$$

$$I_0 = 10^{-12}\text{W/m}^2 = 10^{-16}\text{W/cm}^2$$

Decibel

- **Decibel (dB)** é uma unidade inventada para medir a intensidade do som. Ela é uma razão entre valores, com um valor de referência. Como a intensidade absoluta dos sons varia em uma escala muito grande, a unidade é definida em termos de uma escala logarítmica.
- O decibel (**dB**) nada mais é do que a décima parte de um Bel, ou seja, 0,1 Bel.

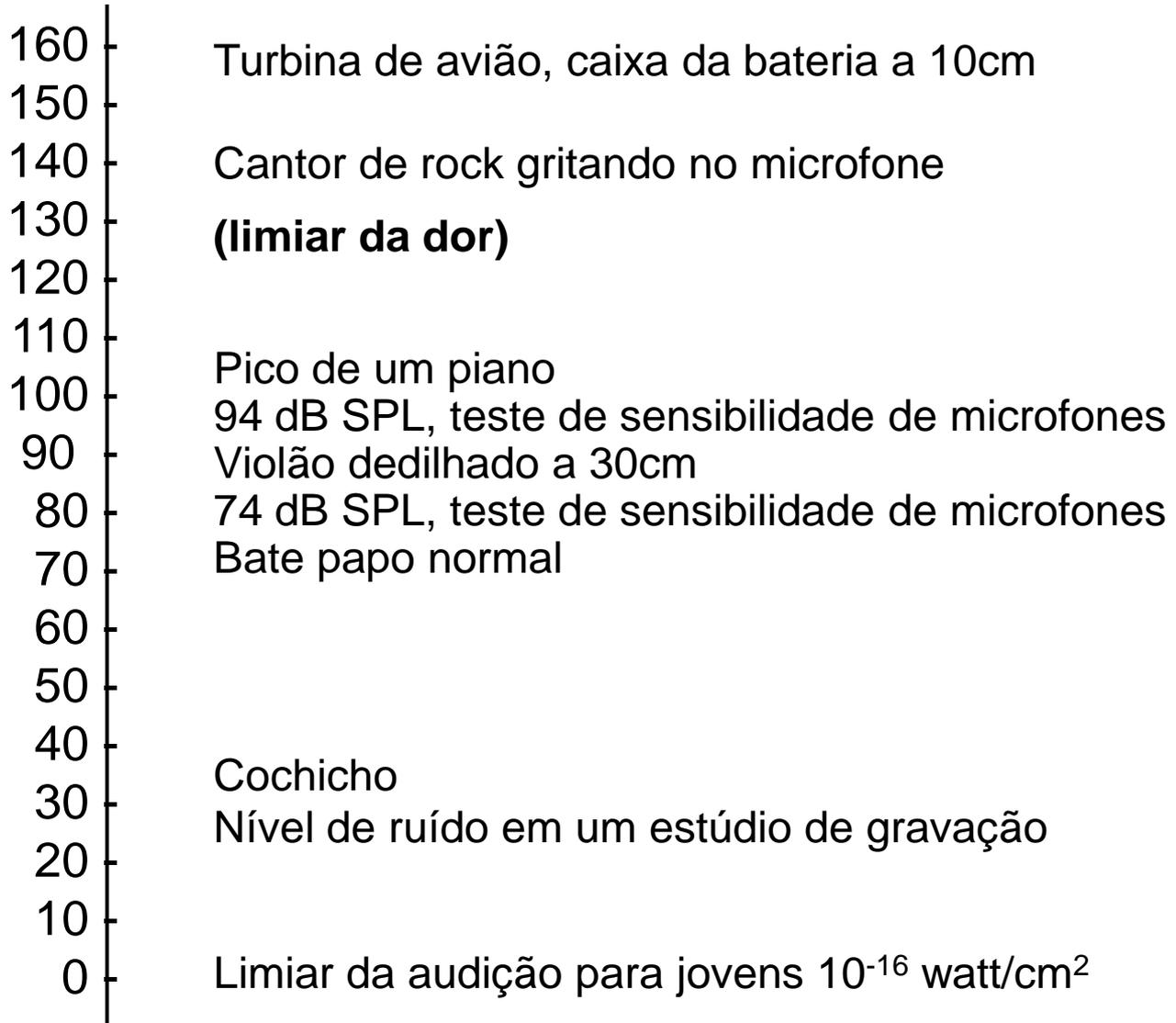
Potência de uma onda sonora

- Volume (nível de áudio): decibel (dB)
 - 1 dB = menor **mudança** de volume perceptível
 - É uma medida **relativa** entre tensões, correntes, potências ou pressões acústicas
$$\text{dB} = 10 \times \log_{10} (\text{nível/nível de referência})$$

Existem vários níveis de referência

- dBm: 1 miliwatt
- dBu ou dBv: 0.775 volt
- dBV: 1 volt
- dB NIS: 10^{-12} Watt/m² (limiar da audição)

dB



Intensidade

A intensidade I de um som pode ser percebida com precisão, e está relacionada com a quantidade de energia sonora recebida por segundo a partir da fonte de som. Os seres humanos podem perceber um amplo intervalo de intensidade, de 10^{-12} Wm^{-2} até 100 Wm^{-2} .

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

dB = 10 x log da razão de intensidades

$$\text{dB} = 10 \times \log_{10}(I/I_0)$$

I – Intensidade medida em Wm^{-2}

I_0 – Intensidade de referência, normalmente 10^{-12} Wm^{-2} , aproximadamente igual ao limiar de audibilidade a 1000 Hz.

Nível de Intensidade

- Um resultado importante de se trabalhar com nível de intensidade é que se a intensidade do som é dobrada, isso corresponde apenas a um aumento de 3 dB no nível de intensidade sonora.
- Mas, na prática é mais fácil medir variação de pressão do que intensidades.

Nível de pressão sonora: decibel

- Para se medir o nível de pressão sonora é necessário uma pressão de referência, P_0 . Usamos uma pressão sonora que é aproximadamente igual ao limiar de audibilidade a 1000 Hz, isto é, a pressão exercida por uma onda de som de um som de 1000 Hz no tímpano, que é apenas o suficiente para ser ouvida. Esta pressão é tomada como sendo $2 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2$. A escala de intensidade do som é então dada por:

$$SPL = 20 \log_{10}(P/P_0) \text{ dB}$$

(Note que a fórmula para a escala usa $20 \log$ em vez de $10 \log$, já que a intensidade é proporcional ao quadrado da amplitude de pressão.)

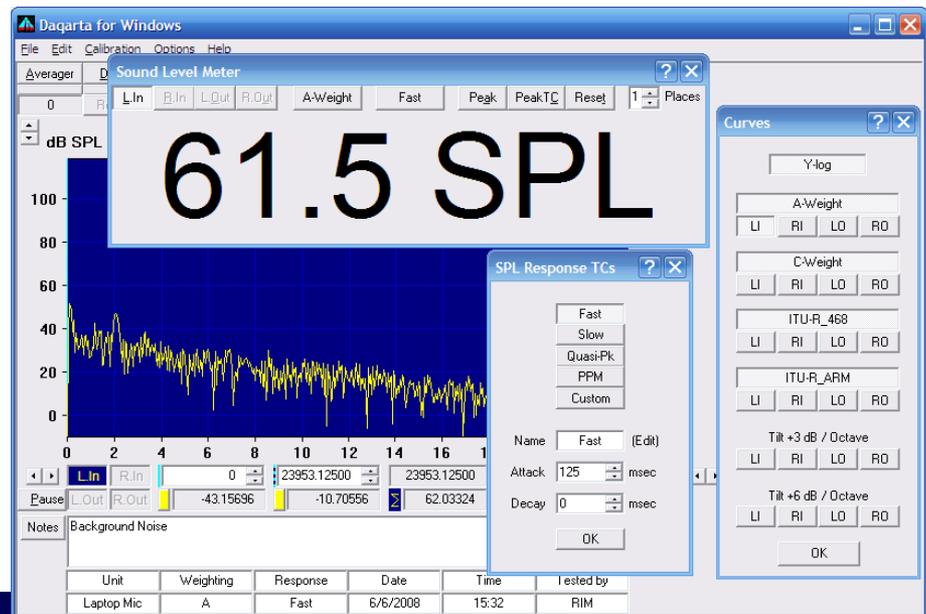
Nível de Pressão Sonora (NPS)

- **Nível de Pressão Sonora (NPS)**
- ***Sound Pressure Level (SPL)***

Utilizando-se a equação Fechner e Weber, e utilizando o nível de pressão sonora de referência como sendo $P_0=20 \mu\text{Pa}$ por ser esta a mínima pressão sonora audível por um indivíduo otologicamente normal e utilizando-se $K=20$, temos:

$$\text{NPS} = 20 \log P/P_0$$

$$P_0=20 \mu\text{Pa}$$



NPS ou SPL

N/m²	dB re 2 x 10⁻⁵ N/m²	
200	140	Limiar de dor
20	120	Decolagem de avião
2	100	Tiro a 5 m
2 x 10⁻¹	80	Rádio com volume alto
2 x 10⁻²	60	Conversação
2 x 10⁻³	40	Ruído de fundo em uma sala
2 x 10⁻⁴	20	Sala muito quieta
2 x 10⁻⁵	0	Limiar da audição

Exemplo

- Se dois violinos produzem sons com SPL ou NPS de 50dB (referência= 20×10^{-6} Pa) cada um, qual é o SPL total resultante?

Para um violino:

$$50 = 20 \log(p_1 / 2 \cdot 10^{-5})$$

$$p_1 = 6,32 \times 10^{-3} \text{ Pa}$$

Dois violinos:

$$\text{dB} = 20 \log ((p_1 + p_1) / 2 \times 10^{-5})$$

$$\text{dB} = 56$$

Níveis de Intensidade e Pressão

Nível de Pressão Sonora - Sound pressure level, dB

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

$$\text{onde } P_{\text{ref}} = 2 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2$$

Nível de Intensidade Sonora - Sound intensity level, dB

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

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

Nível de Potência Sonora – Sound power level, dB

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

Níveis em dB

$$P \propto \sqrt{I}$$

$$I \propto P^2$$

$$I = \frac{P^2}{Z_c}$$

- Se a intensidade sonora aumentar de um dado fator, a pressão média aumentará somente a raiz quadrada desse fator.
- Se a pressão sonora aumentar de um dado fator, a intensidade sonora aumentará o quadrado daquele fator

Relação entre *dB NI* e *db NP*

- Uma razão de intensidade de 10:1 corresponde a 10 dB. Mas uma razão de pressão de 10:1 corresponde a 20 dB.
- Conclui-se, por exemplo, que 60 dB NI = 120 dB NP? **NÃO**
- Cuidado, pois se a intensidade aumenta de um fator 10, a pressão terá aumentado apenas um fator que é a raiz quadrada de 10 (3,1623), e portanto o equivalente em decibels será ainda 20 $\log 3,1623=10$!!

Exemplos e Aplicações

- Se a potência de referência = 10^{-12} Watt
 - 10^{-12} watt = 0 dB
 - Nível de potência:
$$L_w = 10 \log W - 10 \log 10^{-12} = 10 \log W + 120$$
 - Nível de Potência para 0,04 Watt =
$$10 \log(0,04) + 120 = -14 + 120 = 106 \text{ dB}$$
- Se $W = 0,9 \text{ W}$, calcule o nível de potência...

Exemplos e Aplicações

Se $W = 0,9 \text{ W}$, calcule o nível de potência em decibels...

$$L_w = 10 \log 0,9 + 120 = -0,45 + 120 = 119,55 \text{ dB}$$

Exemplos e Aplicações

- Um ruído de 105 dB é medido a uma distância de 25 metros do equipamento. Qual será o NPS a uma distância de 50 m? 12,5 m? 100 m?

99 dB

111 dB

93 dB

Qualidade de um som

- **Altura**
 - Em inglês: Pitch
- **Intensidade**
 - Em inglês: Loudness
- **Timbre**
 - Em inglês: Timbre

Altura

É a qualidade do som que nos permite distinguir os sons graves dos agudos.

Intensidade ou Sonoridade do Som

É a qualidade que nos permite distinguir os sons fortes dos fracos. Volume perceptível do som.

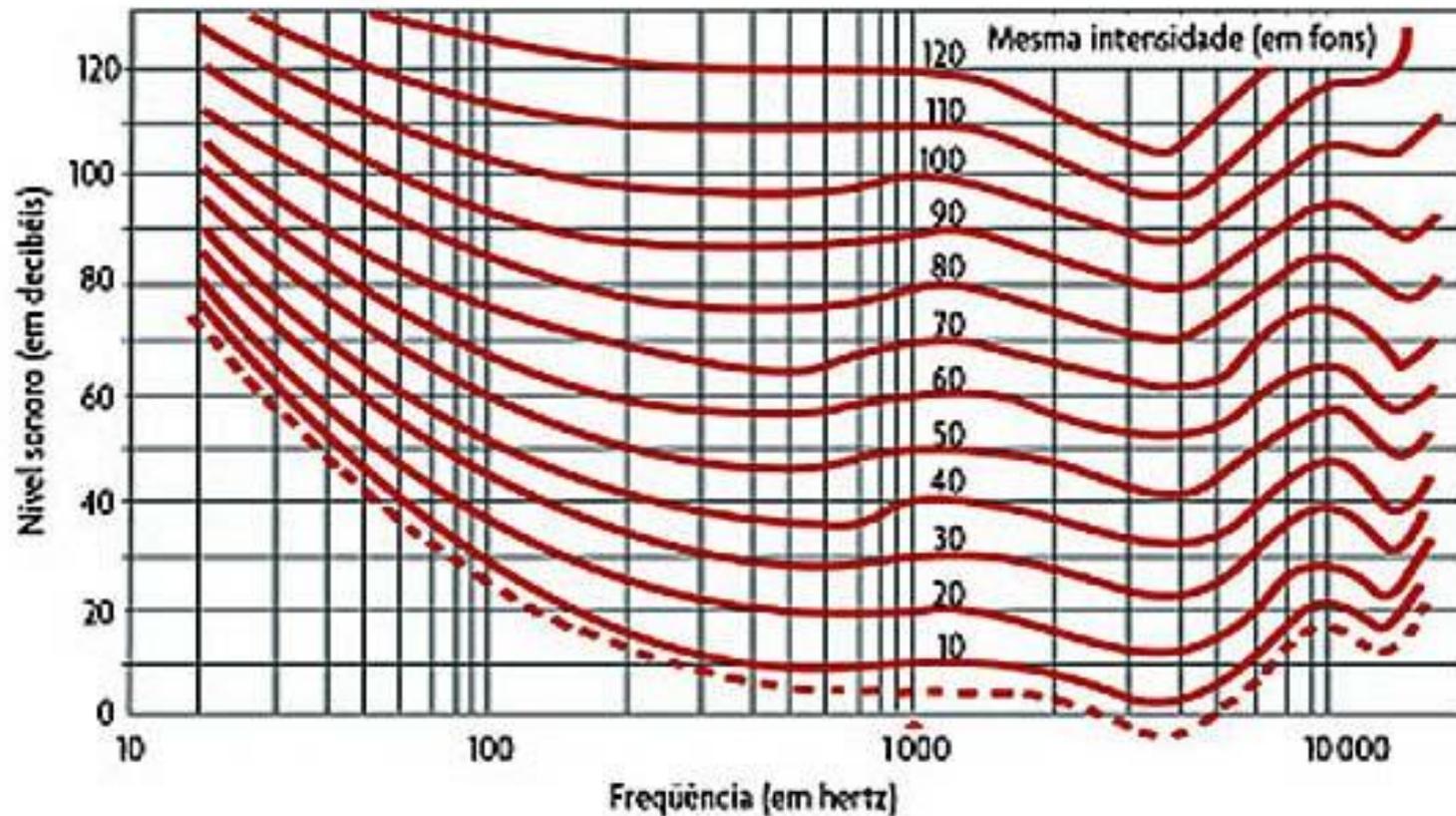
Timbre

- É a qualidade que nos faz distinguir as vozes de duas pessoas, mesmo quando emitindo sons de mesma frequência.
- Também permite diferenciar os sons de dois instrumentos musicais, mesmo quando eles emitem a mesma nota.

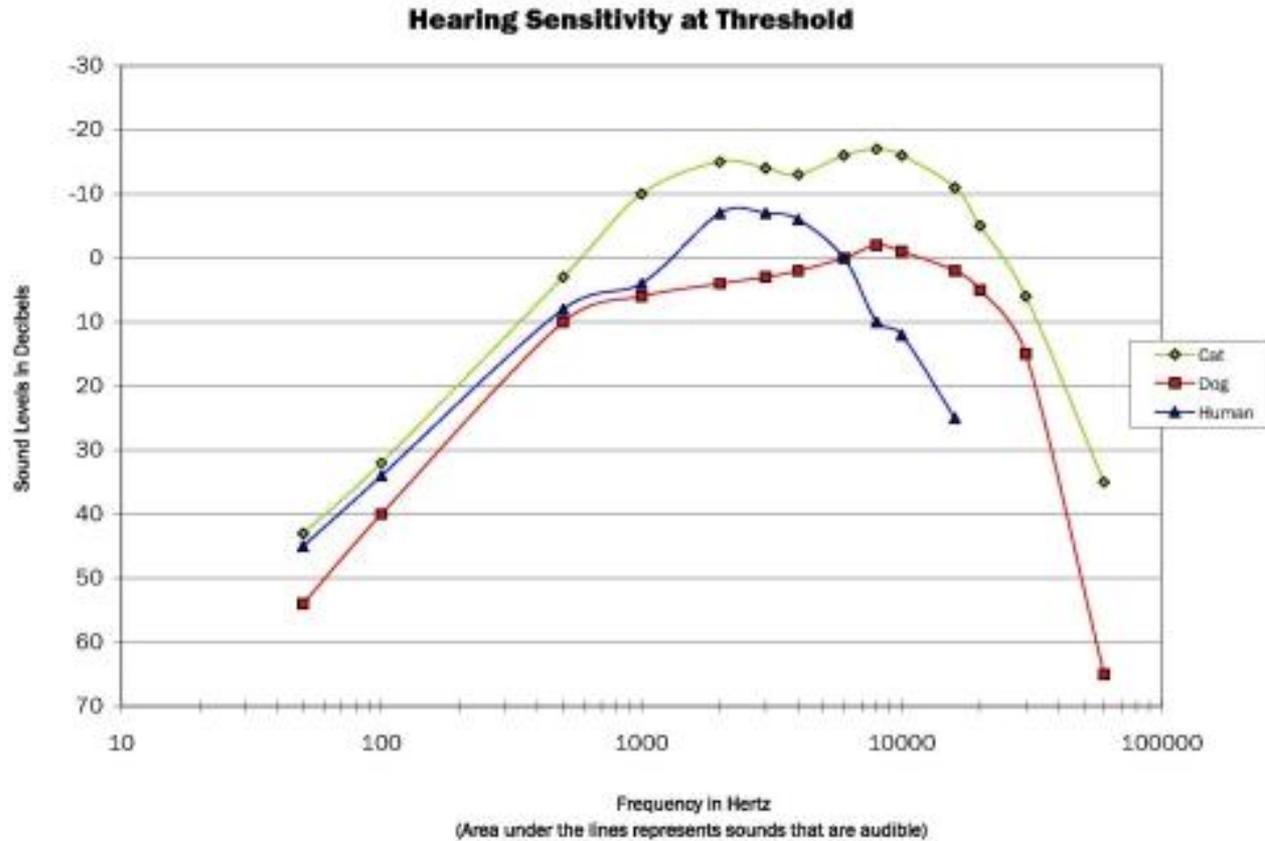
Sensação sonora

- A sensação sonora varia aproximadamente com o logaritmo da pressão sonora.
- O nosso ouvido não reage igualmente para todas as frequências sonoras.
- A sensibilidade varia, e muito, com a frequência do som.
- Dois sons de mesma intensidade **física** mas frequências diferentes podem parecer, para o nosso ouvido, ter intensidades muito diferentes.

Curvas de igual audibilidade ou isofônicas

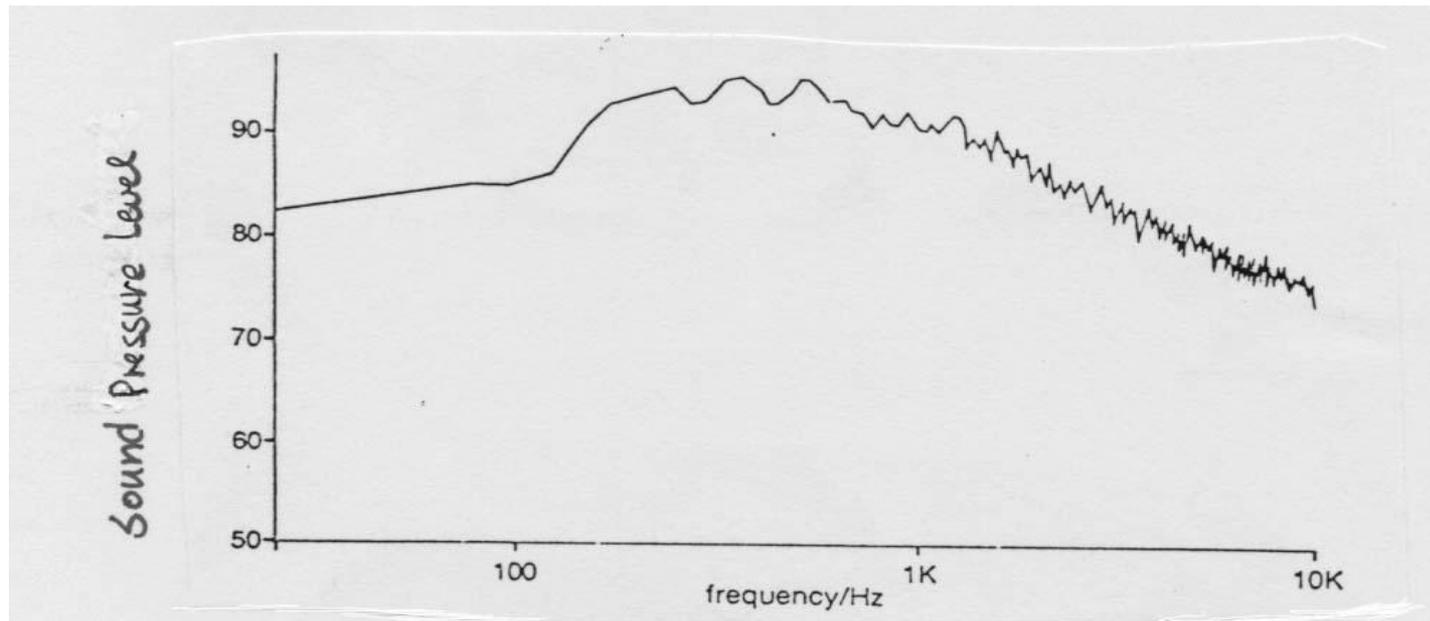


Limiar de audição



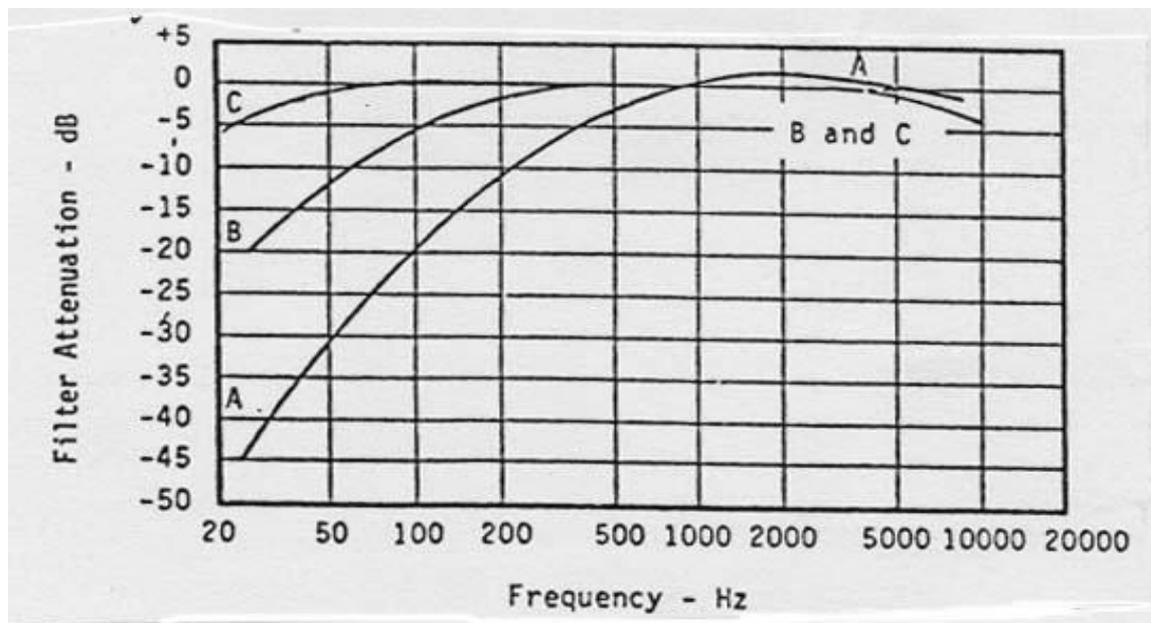
Níveis ponderados, níveis de banda e níveis de espectro

Níveis de ruído associados com fontes diversas de som são geralmente medidos em função da frequência. O espectro em frequência de um ruído é um gráfico do NPS para cada frequência no intervalo de interesse.

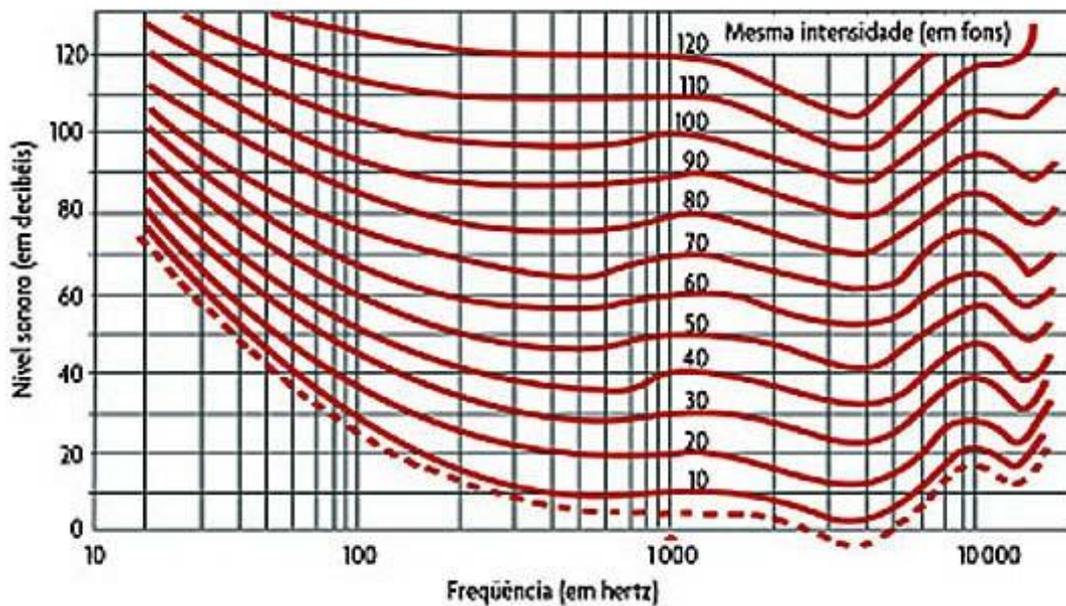
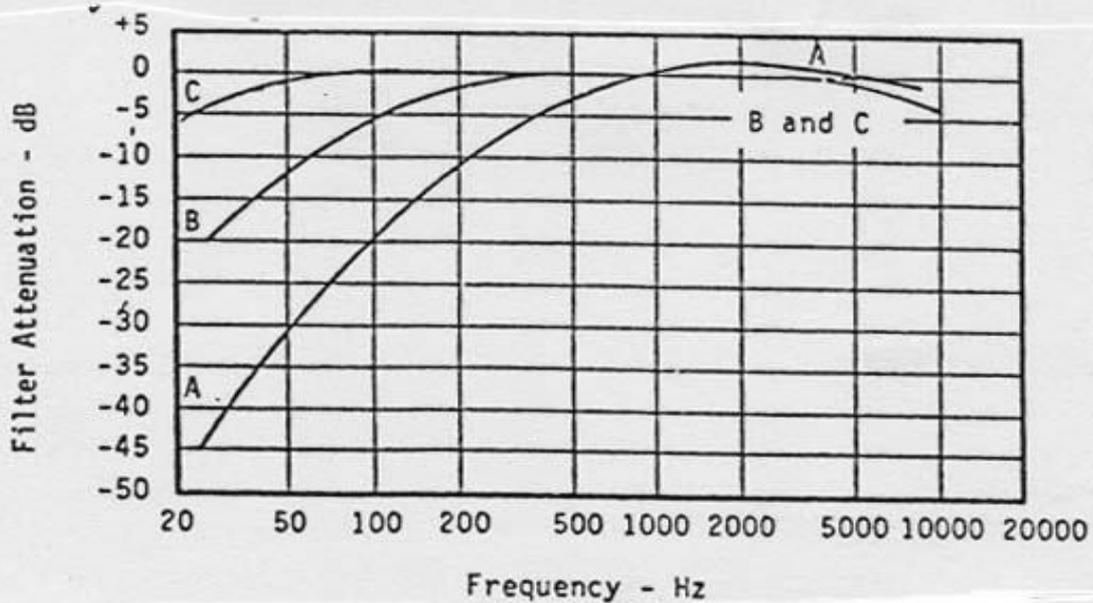


Níveis ponderados, níveis de banda e níveis de espectro

A maioria das fontes de ruído radia energia sonora em um amplo espectro de frequências. Então, faz-se uma “filtragem” do som em diferentes regiões. As redes ponderadas são chamadas A, B, & C.



<http://www.mat.ufrgs.br/~portosil/passa1f.html>

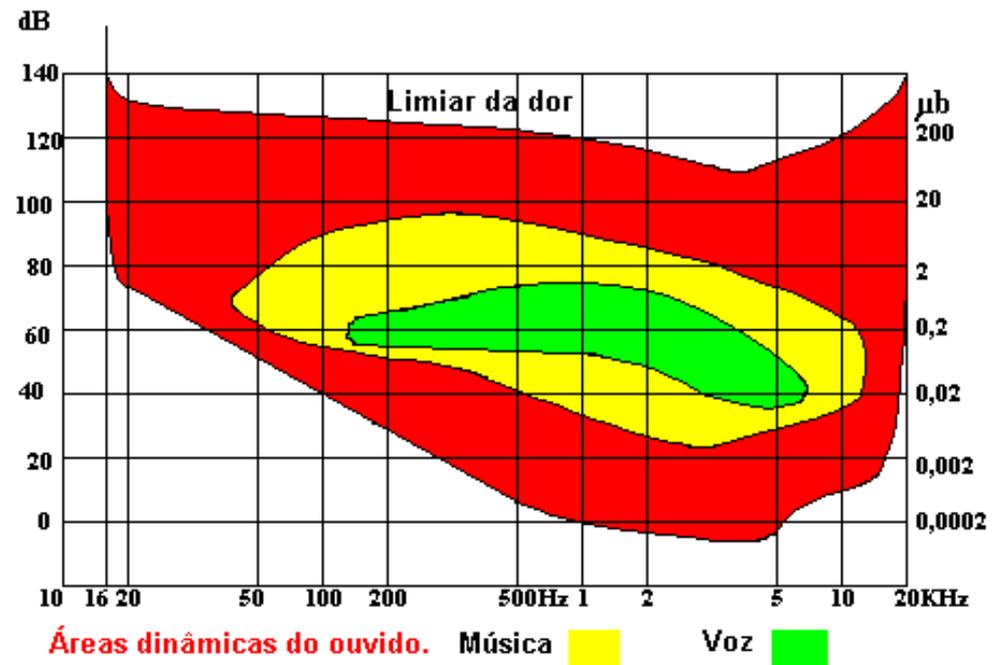


Níveis ponderados, níveis de banda e níveis de espectro

- Os NPSs em diferentes frequências são medidos. A função peso (A, B, C, ou F) é então aplicada aos NPSs medidos.
- Para o peso tipo A, as atenuações em baixas frequências são maiores. Isso corresponde a falta de sensibilidade do ouvido humano para os sons de baixas frequência. Sendo assim, se a diferença entre um NPS ponderado tipo A (em dB A) e um NPS ponderado tipo C (em dB C) é grande, o ruído é composto basicamente de frequências mais baixas do que 1 kHz.

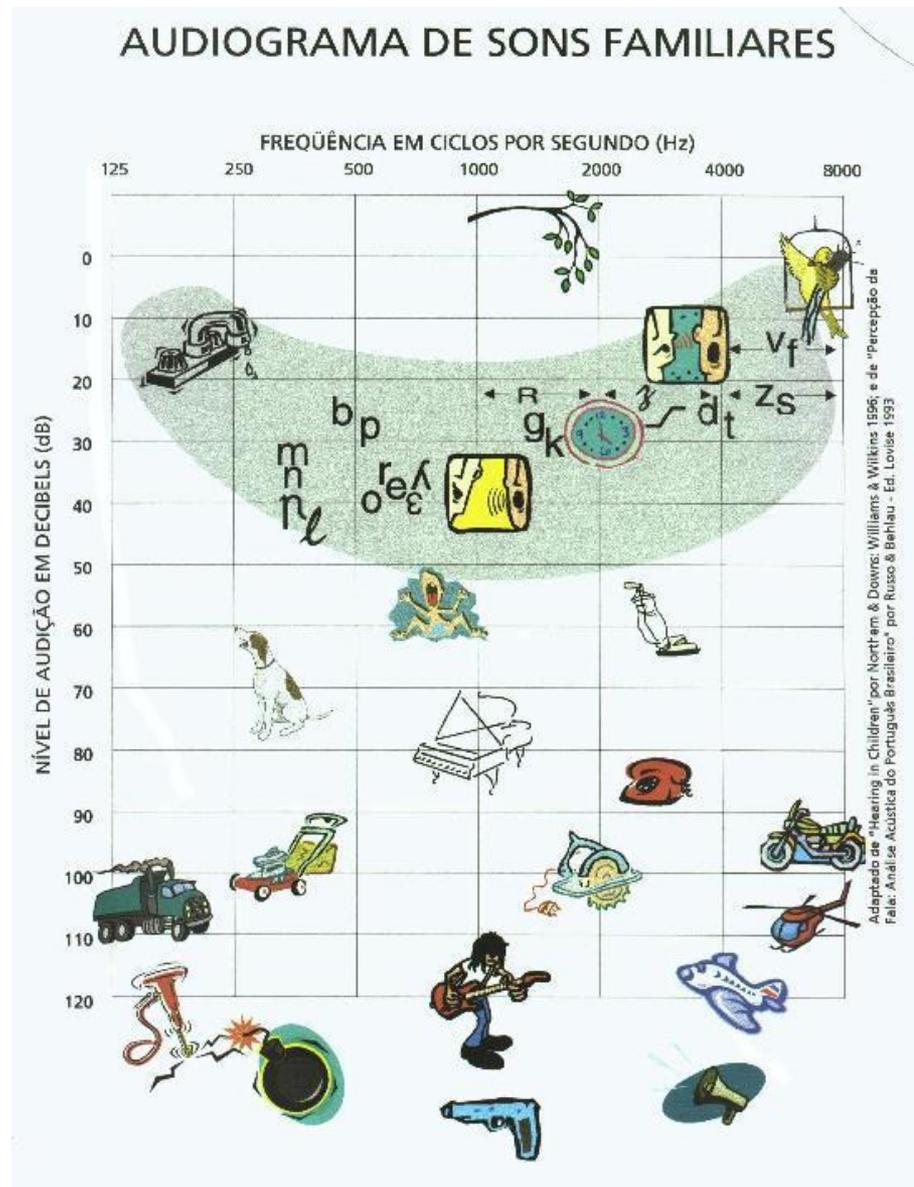
Áreas Dinâmicas da Audição

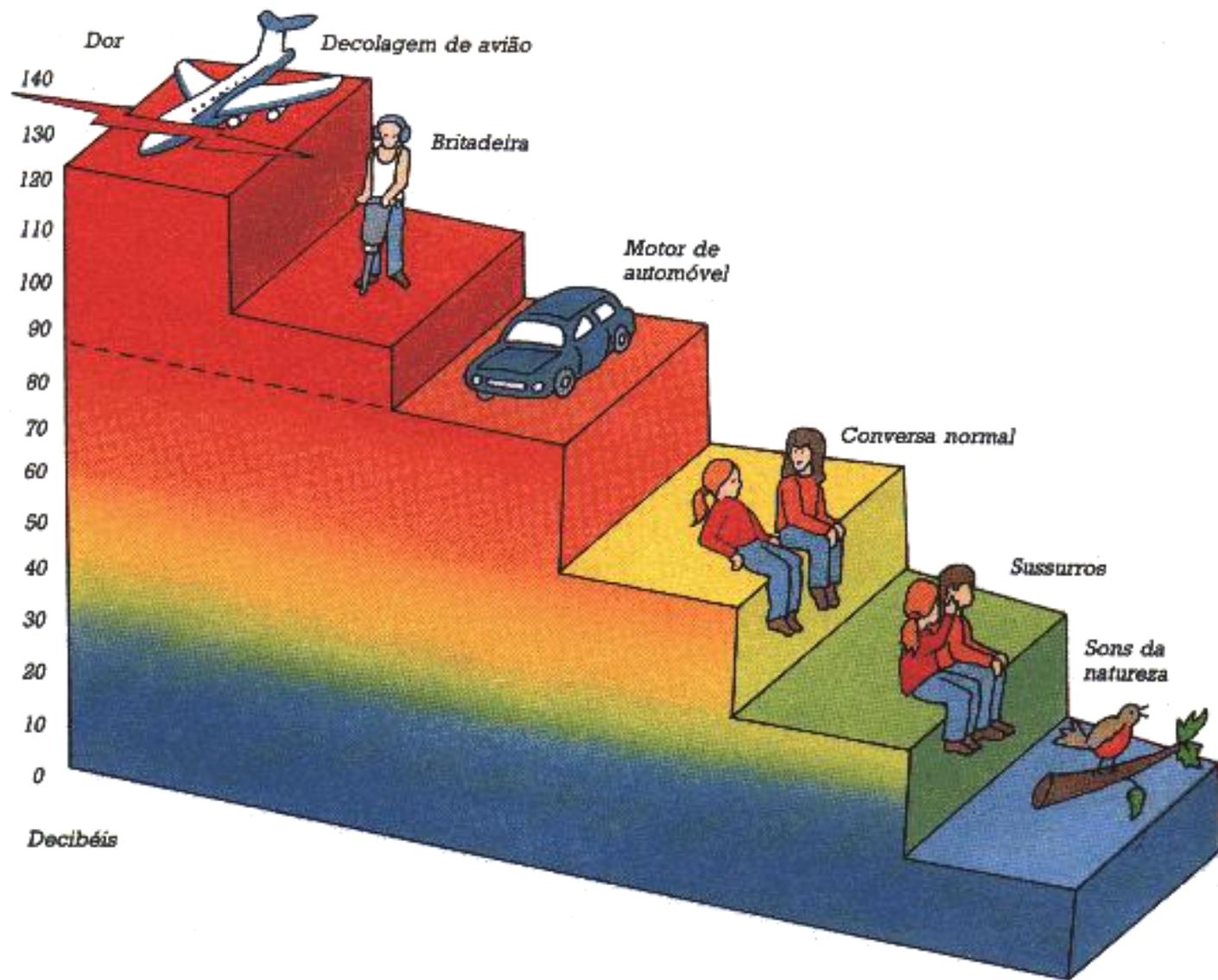
- As áreas dinâmicas de audição são mostradas na figura abaixo. A linha superior é o limiar da dor, a diferentes frequências. A linha inferior é o limiar da audibilidade.



<http://www.if.ufrj.br/teaching/fis2/ondas2/ondas2.html>

Audiograma de sons familiares





Exemplos e Aplicações

- Se uma potência é 4 vezes maior que a referência, o nível em decibel será = 6

$$10 \log 4 = 6 \text{ dB} \quad (\text{Se } 2x = 3 \text{ dB})$$

- Se uma potência é 1.000 maior que a referência, o nível em decibel será = 30

$$10 \log 1000 = 30 \text{ dB}$$

Exemplos e Aplicações

- A pressão sonora é proporcional à raiz quadrada da potência sonora.
- O nível de pressão sonora em decibels é a raiz quadrada do nível de potência correspondente. Se uma pressão é o dobro da outra, decibels = 6

$$2 \times 2 = 4 \quad \text{e} \quad 10 \log 4 = 6 \text{ dB}$$

- Se uma pressão é 100 vezes maior que a outra, decibels = 40

$$100 \times 100 = 10.000 \quad \text{e} \quad 10 \log 10.000 = 40$$

Exemplos e Aplicações

- Qual é a diferença em decibels se a pressão sonora aumenta 50 vezes?

$$50 \times 50 = 2500 \text{ e } 10 \log 2500 = 34\text{dB}$$

Exemplos e Aplicações

- Pressão sonora de referência (P_o) é geralmente 20 μ Pa (micropascal) ou 2×10^{-5} Pa

$$L_p = 20 \log P/P_o$$

- Calcule o NPS em decibels se $P = 1$ Pa

Exemplos e Aplicações

- NPS e distância
- Som originado de uma fonte pontual em campo livre. Mostre que:

L_p será reduzido de 6 dB cada vez que dobrar a distância

L_p será aumentado de 6 dB cada vez que a distância diminuir pela metade.

Decibels, Níveis de Pressão e Intensidade

- Se decibels = 20
 - Razão de Pressão = 10
 - Razão de Intensidade = $100 = 10^2$

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 prever o resultado de uma combinação de fontes de ruído?

Você não pode obter as respostas simplesmente adicionando decibels – Você deve somar intensidades ou pressões

Combinando níveis de Ruído

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