



Capítulo 2

Propriedades Físicas do Som

1. - Introdução

O som é um fenômeno vibratório resultante de variações da pressão no ar. Essas variações de pressão se dão em torno da pressão atmosférica e se propagam *longitudinalmente*, à velocidade de 344 m/s para 20 ° C (fig. 2.1).

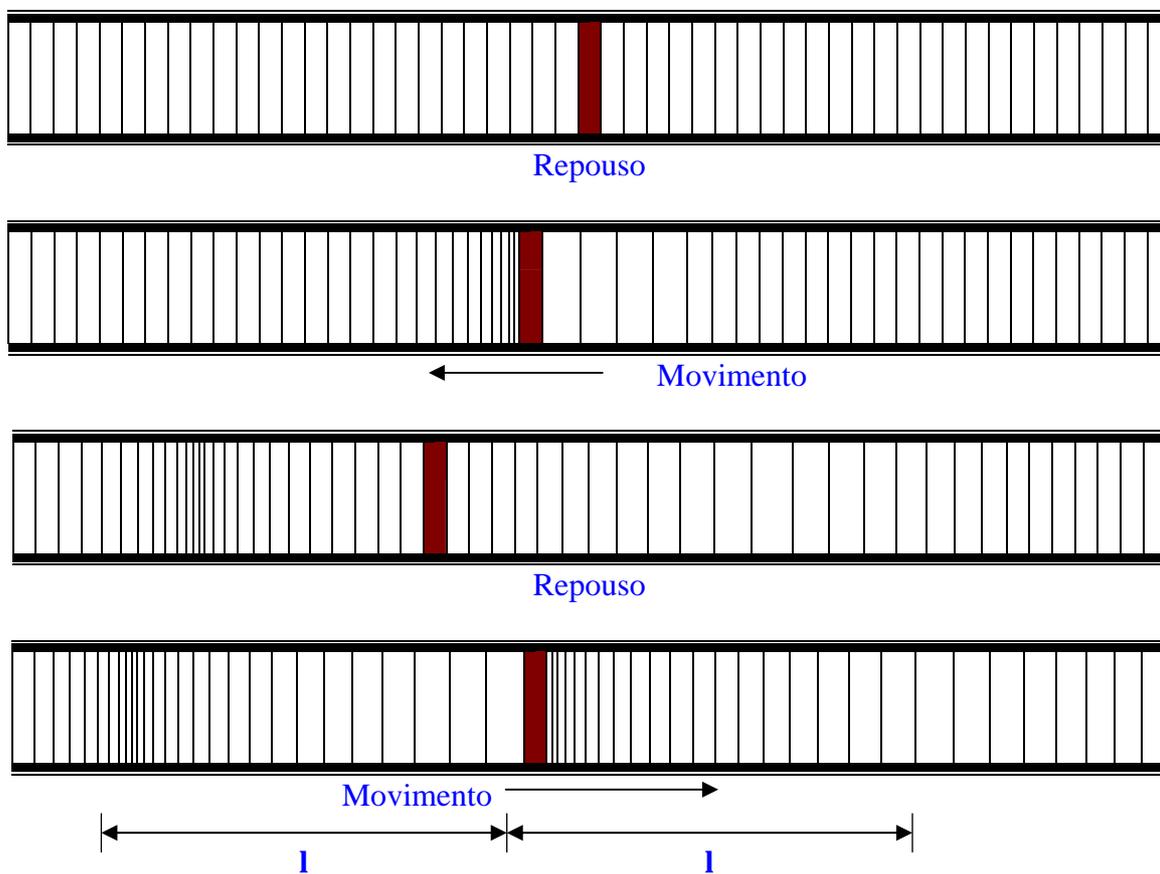


Figura 2.1 - Propagação do Som por ondas longitudinais.

Qualquer fenômeno capaz de causar ondas de pressão no ar é considerado uma fonte sonora. Pode ser um corpo sólido em vibração, uma explosão, um vazamento de gás a alta pressão, etc.

Basicamente, todo som se caracteriza por três variáveis físicas : frequência, intensidade e timbre. Vamos fazer um estudo mais detalhado de cada uma delas.



2. - Frequência

Frequência (f) é a número de oscilações por segundo do movimento vibratório do som. Para uma onda sonora em propagação, é o número de ondas que passam por um determinado referencial em um intervalo de tempo. Chamando de l o comprimento de onda do som e V a velocidade de propagação da onda, pode-se escrever :

$$V = l \cdot f$$

A unidade de frequência (**SI**) é ciclos por segundo, ou **Hertz (Hz)**. Portanto, um som de 32 Hz tem uma onda de 10,63 m e, um som de 20.000 Hz tem um comprimento de onda de 1,7 cm (fig. 2.1).

O nosso ouvido é capaz de captar sons de 20 a 20.000 Hz. Os sons com menos de 20 Hz são chamados de infra-sons e os sons com mais de 20.000 Hz são chamados de ultra-sons. Esta faixa de frequências entre 20 e 20kHz é definida como *faixa audível de frequências* ou *banda audível*.

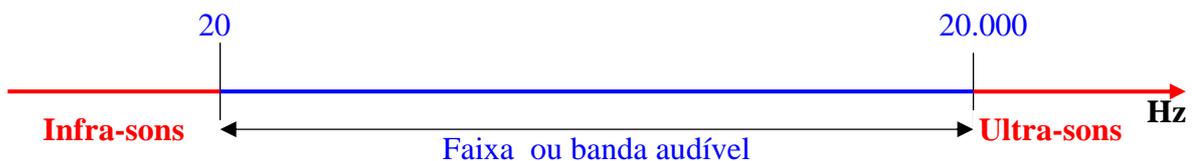


Fig. 2.2 – Faixa audível de frequências

Dentro da faixa audível, verificamos que o ouvido percebe as frequências de uma maneira não linear. Experiências demonstram que o ouvido humano obedece a **Lei de Weber** (ver Capítulo 5), de estímulo/sensação, ou seja, as sensações como cor, som, odor, dor, etc., variam como o logaritmo dos estímulos que as produzem.

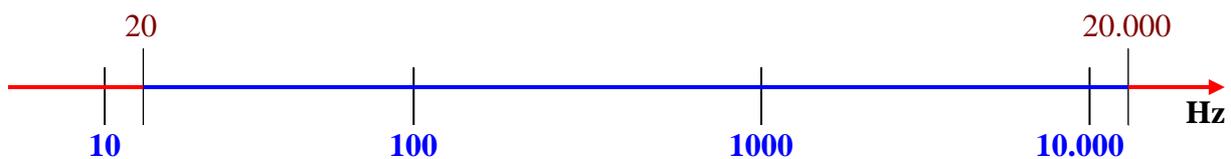


Fig. 2.3 – Sensação da audição das frequências do som

Assim, os intervalos entre os sons de 100 e 200 Hz, 200 e 400 Hz, 400 e 800 Hz parecerão iguais ao nosso ouvido. Portanto, pela Lei de Weber, concluímos que o intervalo entre frequências não se mede pela diferença de frequências, mas pela relação entre elas. Desta maneira, se define **uma oitava** como sendo o intervalo entre frequências cuja relação seja igual a 2.

$$\frac{200}{100} = \frac{400}{200} = \frac{800}{400} = 2 \Rightarrow 1 \text{ oitava}$$

Esta é a razão que intervalos entre as notas **DÓ** sucessivas de um teclado de piano parecem sempre iguais, constituindo o intervalo de uma oitava (fig. 2.4). Em qualquer



representação gráfica (figuras ou gráficos) colocamos a frequência em escala logarítmica, por ser a forma que mais se aproxima da sensação do nosso ouvido.

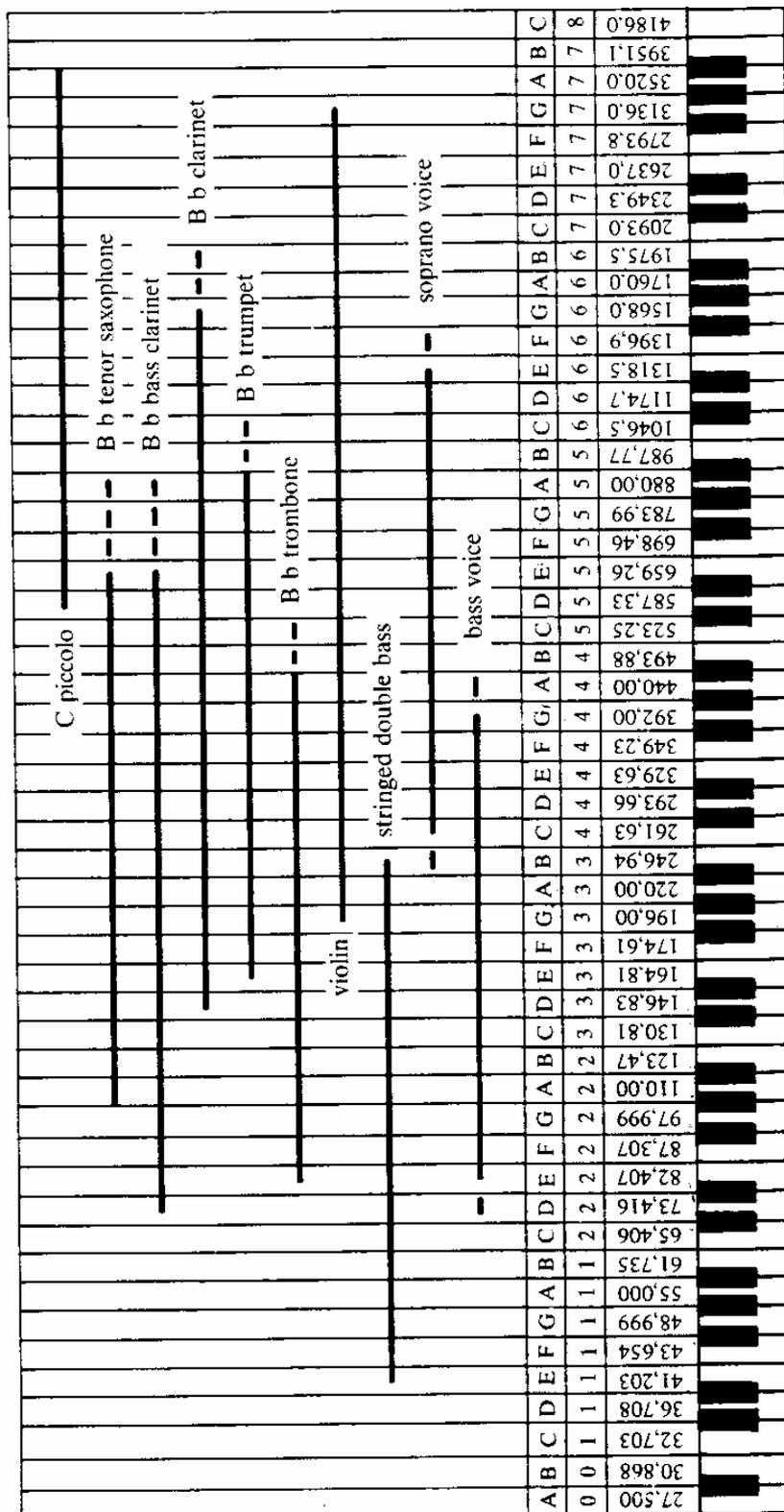


Figura 2.4. - Frequências das teclas do piano



Atualmente, usamos como frequência de referência (padronizada pelo SI), o valor de 1000 Hz, ficando as oitavas com frequência central em 500, 250, 125, 62,5, 31,25, e 2.000, 4.000, 8.000 e 16.000 Hz.

As frequências audíveis são divididas em 3 faixas :

⇒ **Baixas frequências ou sons graves** ⇒ as 4 oitavas de menor frequência, ou seja, 31,25, 62,5, 125 e 250 Hz.

⇒ **Médias frequências ou sons médios** ⇒ as três oitavas centrais, ou seja, 500, 1000 e 2000 Hz.

⇒ **Altas frequências ou sons agudos** ⇒ as três oitavas de maior frequência, ou seja, 4.000, 8.000 e 16.000 Hz.

3. - Intensidade

A intensidade do som é a quantidade de energia contida no movimento vibratório. Essa intensidade se traduz com uma maior ou menor amplitude na vibração ou na onda sonora. Para um som de média intensidade essa amplitude é da ordem de centésimos de milímetros.

A **intensidade** de um som pode ser medida através de dois parâmetros :

➔ a **energia** contida no movimento vibratório (**W/cm²**)

➔ a **pressão do ar** causado pela onda sonora (**BAR = 1 dina/cm²**)

Como valor de referência para as medições, fixou-se a menor intensidade sonora audível. Esse valor, obtido da média da população, foi de :

☞ para energia = 10^{-16} W/cm²

☞ para pressão = 2×10^{-4} BAR

Como podemos notar, do ponto de vista físico, a energia contida num fenômeno sonoro é desprezível. A energia sonora contida num grito de "gol" de um estádio de futebol lotado, mal daria para aquecer uma xícara de café. Se a energia da voz de toda a população de uma cidade como Bauru fosse transformada em energia elétrica, seria o suficiente apenas para acender uma lâmpada de 50 ou 60 Watts.

Ao fazermos uma relação entre a intensidade sonora e a audição, novamente nos encontramos com a **Lei de Weber**, ou seja, conforme aumentamos a intensidade sonora o nosso ouvido fica cada vez menos sensível ; ou ainda, precisamos aumentar a intensidade de maneira exponencial para que o ouvido "sinta" o som de maneira linear.

Desta maneira, quando escutamos um aparelho de som que esteja reproduzindo 20 Watts de potência elétrica, e aumentamos instantaneamente a sua potência para 40 Watts, o som nos parecerá mais intenso. Se quisermos agora, aumentar mais uma vez o som para que o resulte a mesma sensação de aumento, teremos que passar para 80 Watts.

Portanto, usamos uma escala logarítmica para a intensidade sonora, da mesma maneira que usamos para a frequência.

Para sentirmos melhor o problema, analisemos o gráfico da figura 1.5., onde temos intensidades sonoras desde 10^{-16} W/cm² (limiar de audibilidade), até 10^{-2} W/cm² (limiar da dor). Nota-se que o nosso ouvido tem capacidade de escutar sons cuja diferença de intensidade seja de cem trilhões de vezes.



Se quiséssemos usar a escala linear de intensidade sonora, teríamos que dizer, por exemplo, que o ruído da rua de uma cidade é 100 milhões de vezes mais intenso que o menor som audível. Logo se vê a improbidade desses números: matematicamente são impraticáveis e, fisiologicamente, não refletem a sensação audível.

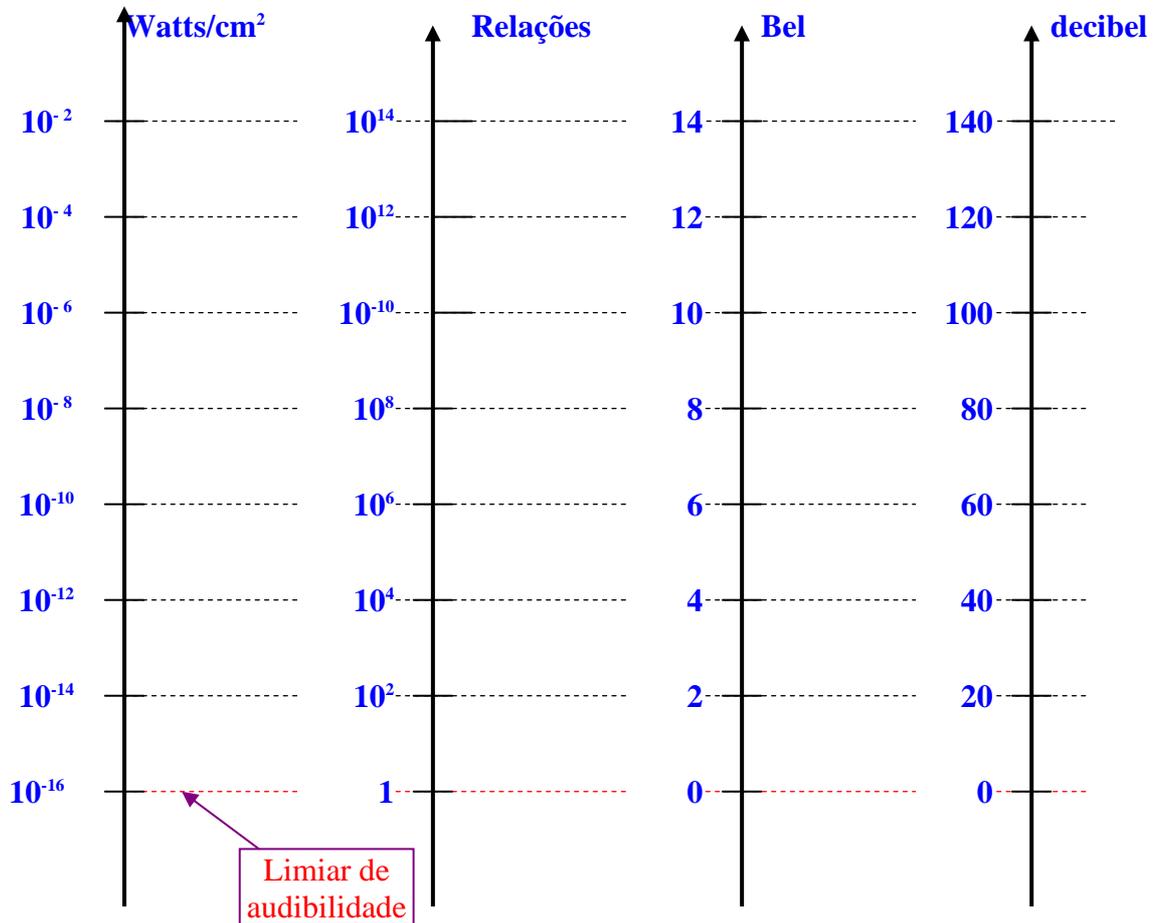


Figura 2.5. – Esquema da formação da escala em decibels

Para contornar esses problemas lançamos mão da escala logarítmica. Vamos usar apenas o expoente da relação (figura 2.5) e dizer que o ruído da rua está **8 BELs** acima do limite de audibilidade (com valor de **0 BEL**). O nome **BEL** foi dado em homenagem a **Alexandre Graham Bell**, pesquisador de acústica e inventor do telefone.

Agora a escala ficou reduzida em excesso pois, entre o limiar de audibilidade e o ruído da rua existem mais de 8 unidades de sons audíveis. Foi criado, então, o **décimo do BEL**, ou seja, o **decibel**: dizemos agora que o ruído da rua está **80 dB** (com o "d" minúsculo e o "B" maiúsculo), acima do valor de referência.



Portanto, o número de decibels (dB) nada mais é que aquele expoente da relação das intensidades físicas, multiplicado por 10.

A intensidade sonora medida em decibels é definida como **Nível de Intensidade Sonora (NIS)** ou **Sound Intesity Level (SIL)**, em inglês.

Portanto devemos sempre ter em mente :

- **Intensidade Sonora ⇒ Watts / cm²**
- **Nível de Intensidade Sonora - NIS - ⇒ decibels (dB)**

**A unidade de medida de intensidade sonora é W / cm² ou BAR.
O decibel não é uma unidade de medida, mas apenas uma escala.
O plural de decibel é decibels. O termo "decibeis" é errado, embora tenha se tornado de uso popular.**

Assim, o NIS, medido em decibels, satisfaz a construção fisiológica do nosso ouvido. Matematicamente podemos escrever :

$$\text{NIS} = 10 \cdot \log \frac{I}{I_{\text{ref}}}$$

sendo **I** a intensidade sonora de um som, e **I_{ref} = 10⁻¹⁶ W / cm²**.

Voltando ao exemplo do aparelho de som com 20 Watts, digamos que o aparelho reproduza 60 dB de nível de intensidade sonora no ambiente; com 40 W, o aparelho reproduzirá 63 dB, e com 80 W, 66 dB. Da mesma forma, um avião à jato produz perto de 140 dB de NIS; dois aviões idênticos produzirão 143 dB.

**Portanto, na escala em decibels, o dobro de 70 dB é 73 dB, assim como o dobro de 120 dB é 123 dB. A metade de 90 dB é 87 dB, assim como a metade 150 dB é 147 dB.
Desta forma, se uma máquina produz 60 dB, mil máquinas idênticas produzirão 90 dB.
Para um operário trabalha 8 horas/dia num ambiente com 100 dB de ruído, se ele trabalhar apenas 4 horas/dia ele estaria exposto, em média a 97 dB.**

As figuras 2.6, 2.7 e 2.8 mostram alguns níveis de intensidade de som.

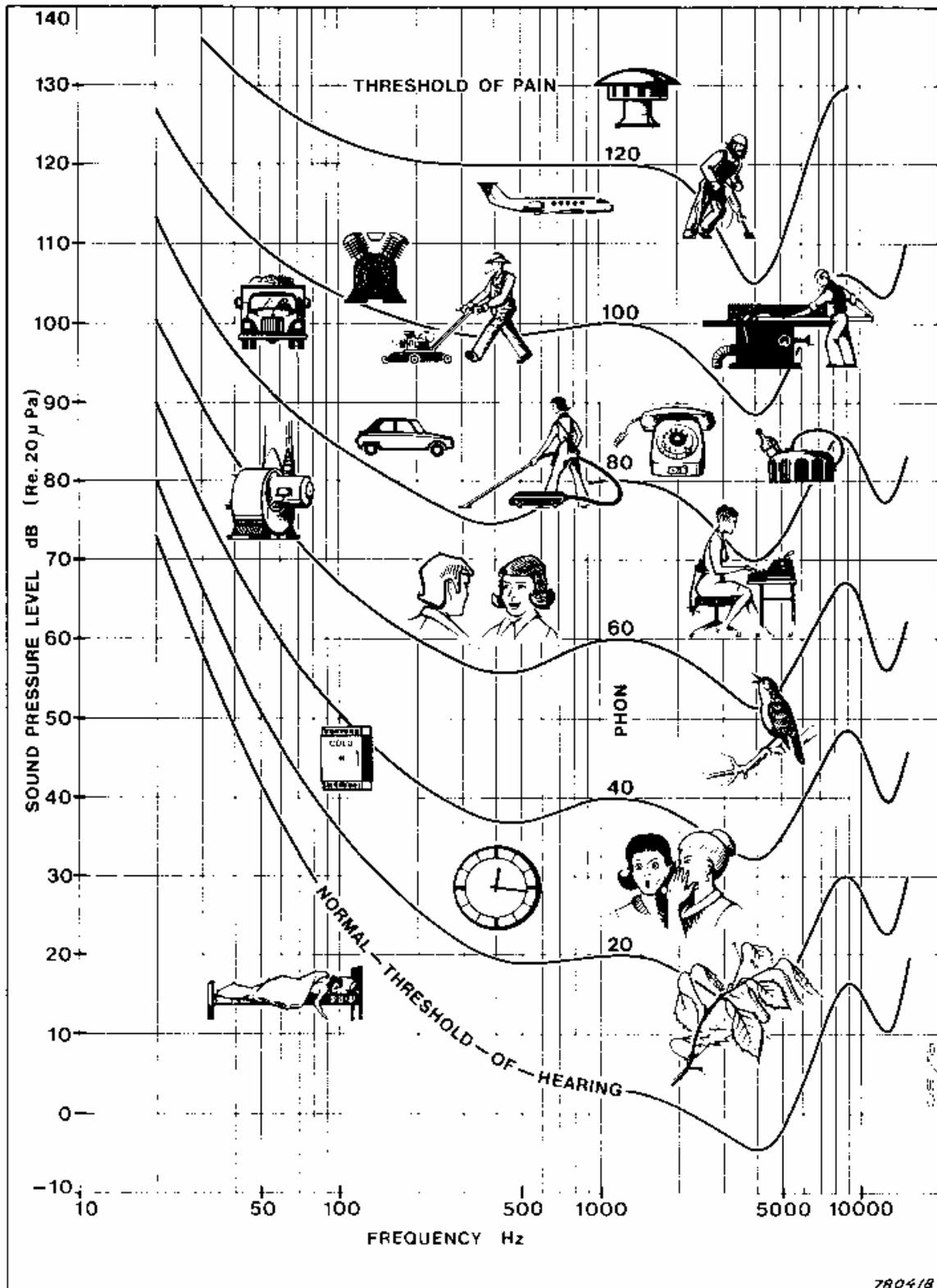


Figura 2.6 - Exemplos de Níveis de Intensidade Sonora (NIS)

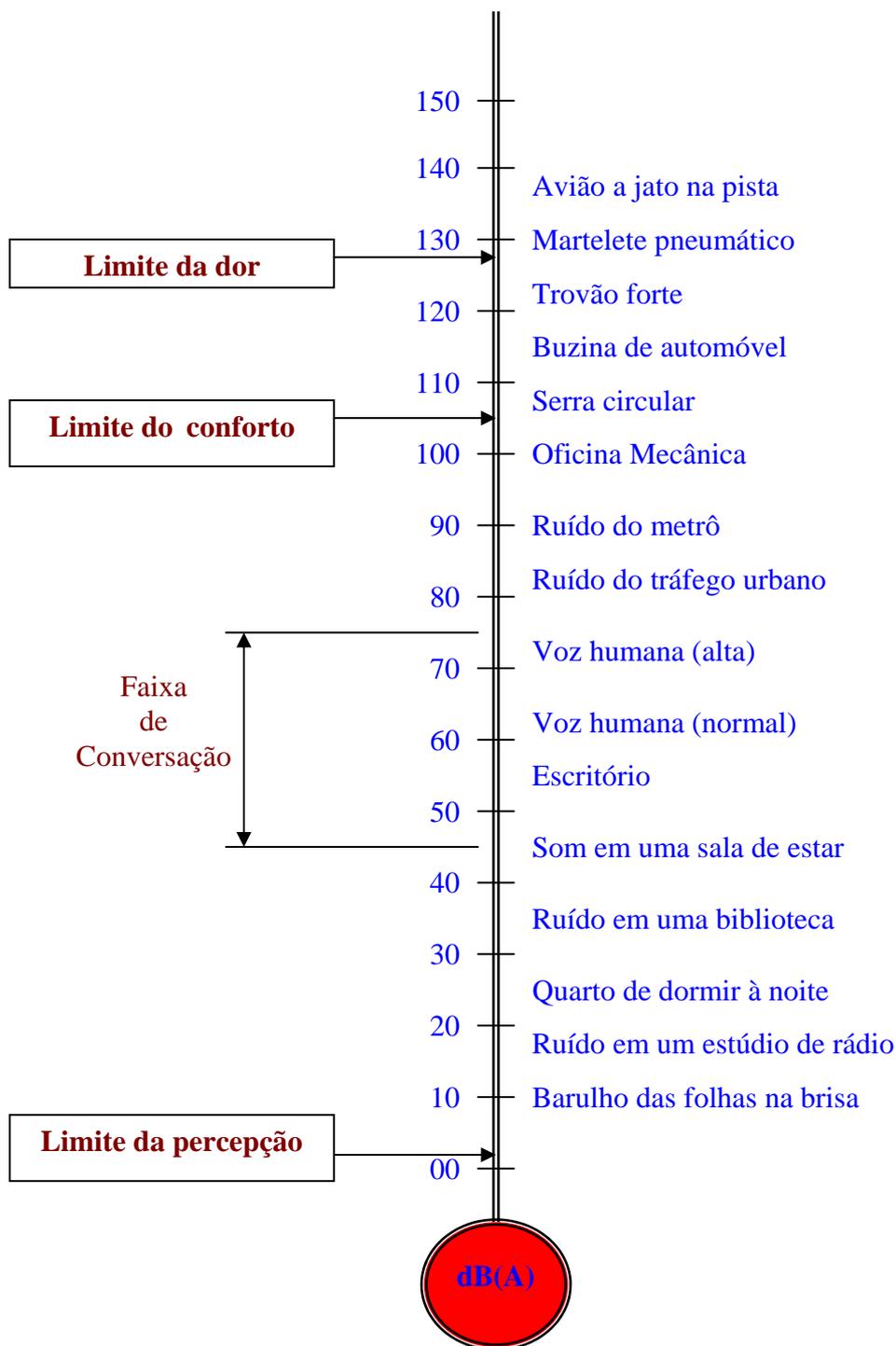


Figura 2.7 : Alguns exemplos de intensidade sonora

É importante notar que existe uma nítida divisão entre os sons que se apresentam abaixo e acima da voz humana; os sons com níveis inferiores à nossa voz são naturais, confortáveis e não causam perturbação; ao contrário, os sons superiores à voz humana normalmente são produzidos por máquinas, são indesejáveis, e causam perturbação ao homem.

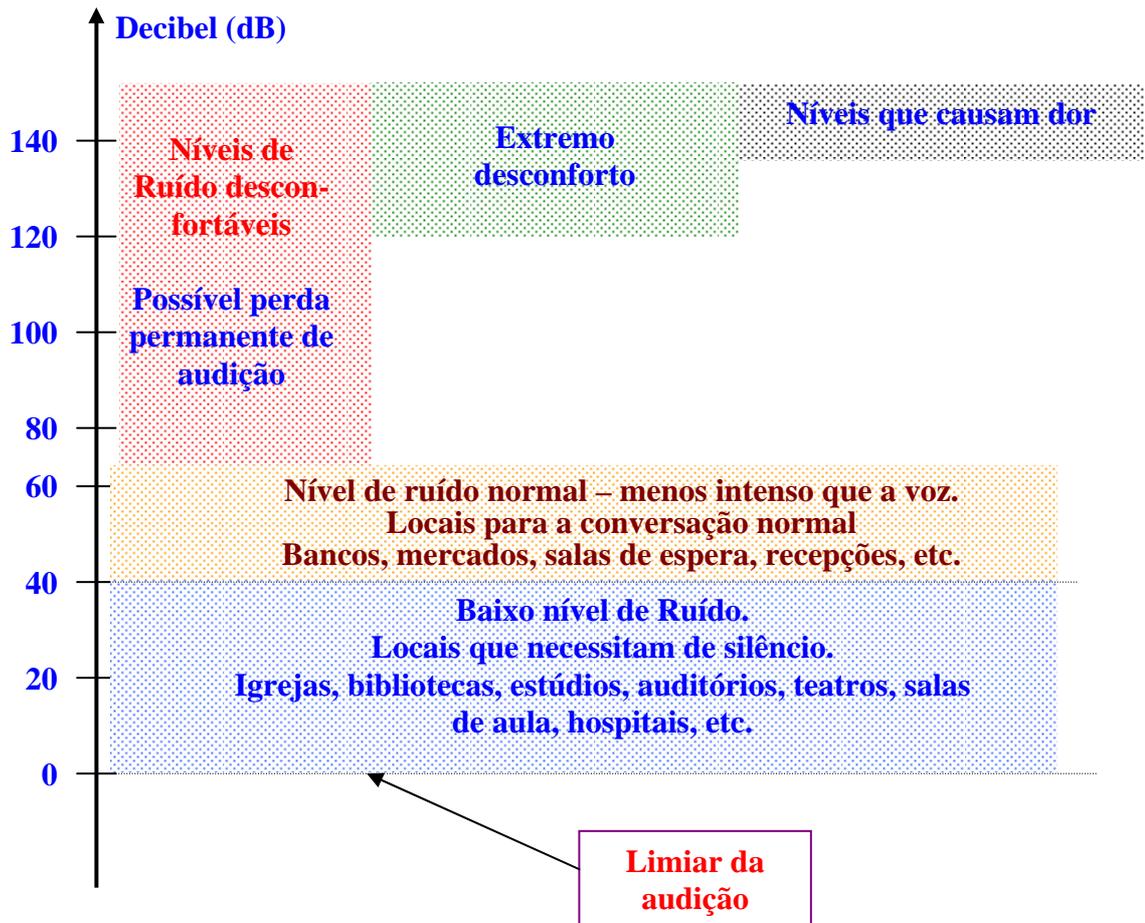


Figura 2.8. – Níveis de ruído em ambientes

4. - Timbre

Se nós tocarmos a mesma nota (mesma frequência) com a mesma intensidade, em um piano e em um violino, notamos claramente a diferença. Em linguagem comum, dizemos que os seus timbres são diferentes. Portanto, o timbre nos permite reconhecer a fonte geradora do som. Tecnicamente, o timbre é a forma de onda da vibração sonora (fig. 2.9).

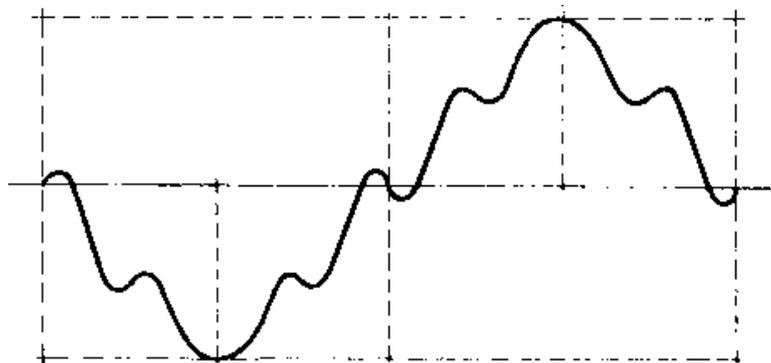


Figura 2.9 - Forma de onda da nota de uma flauta.



5. - Análise Espectral

A análise espectral é o estudo das frequências que compõem um som complexo. Existem várias maneiras de proceder esta análise.

5.1. - Espectro (spectrum) de frequências

O espectro de um som se refere à relação entre amplitude e frequência de um som complexo. O matemático francês Jean Baptiste Fourier (1768 – 1830) foi o primeiro a aplicar este método de análise, conhecido hoje com o nome de *Análise de Fourier*. Este método demonstra que qualquer forma de onda pode ser decomposta em uma soma de ondas senoidais. A frequência destas ondas senoidais que formam o espectro guardam uma relação numérica com a frequência mais baixa da série que, por este motivo, é chamada de frequência fundamental (f_0). As demais frequências, que forem múltiplos inteiros da frequência fundamental, com valores iguais a $2 f_0$, $3 f_0$, $4 f_0$, $5 f_0$, são os sobretons de f_0 e são conhecidas como *tons harmônicos* ou *frequências harmônicas*, sendo registradas por f_1 , f_2 , f_3 , ... f_n . A Figura 2.10 ilustra a Análise de Fourier.

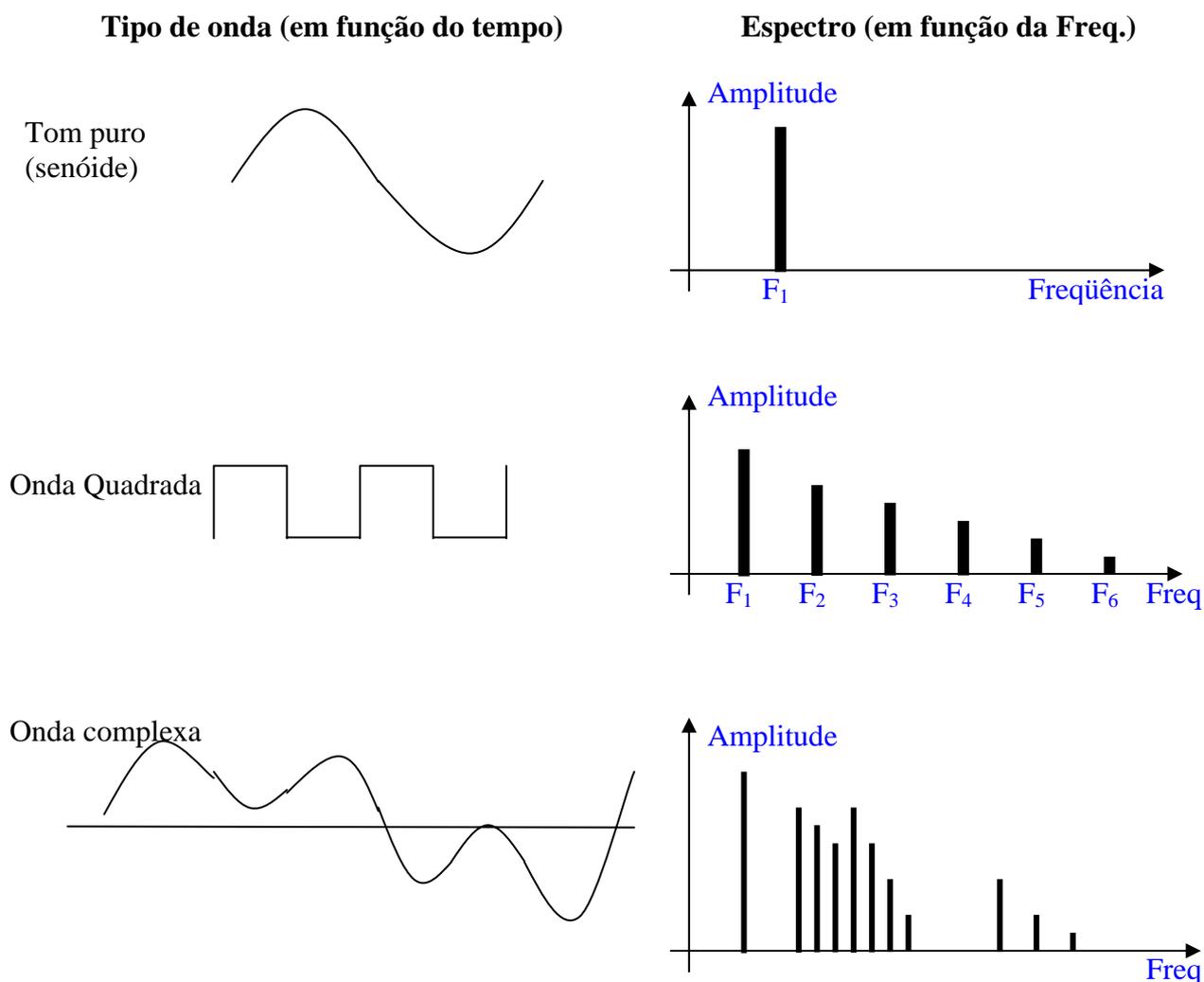


Figura 2.10 : Análise de Fourier.



5.2. - Densidade Espectral de Energia (Power Spectral Density)

A Densidade espectral apresenta a energia do fenômeno vibratório em função da frequência. O gráfico de densidade espectral mostra a energia da onda sonora para cada frequência discreta ou banda de frequência. A Figura 2.11 apresenta um diagrama de Densidade espectral de energia. A Figura 2.12 mostra outros exemplos de espectros e densidade espectral.

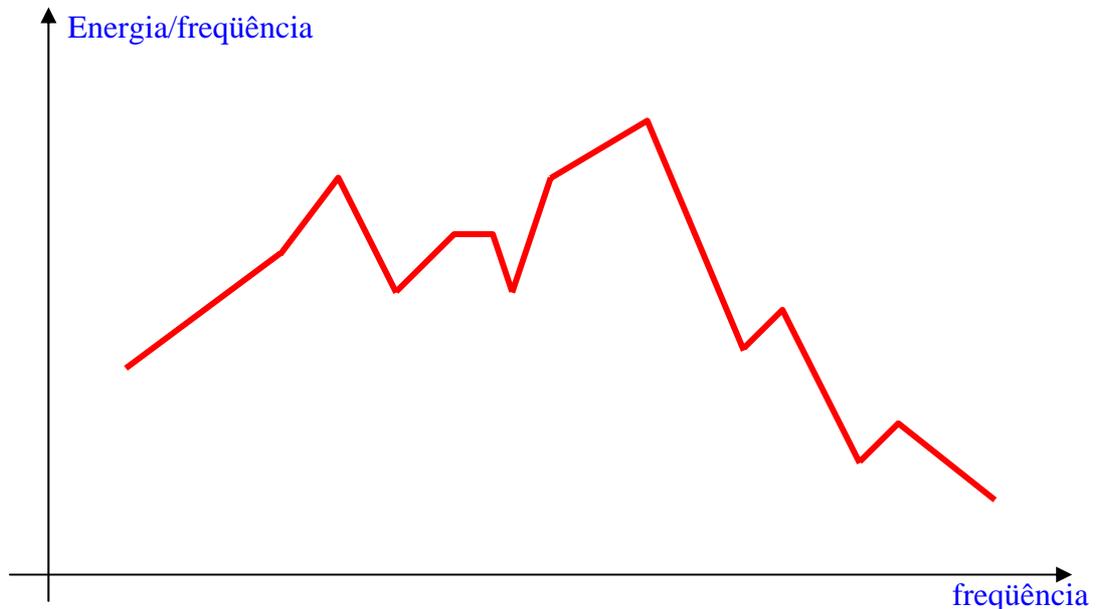


Figura 2.11 : Densidade espectral para um som complexo.

Vamos analisar com atenção a figuras 2.12.

- ◆ A figura 2.12a mostra uma onda senoidal, portanto, um sinal puro.
- ◆ no item b é mostrada a combinação de duas ondas senoidais: o sinal resultante é periódico e o espectro de frequências mostra a decomposição do sinal.
- ◆ a figura 2.12c mostra uma onda quadrada: trata-se de um sinal periódico e o espectro de frequências acusa a formação de um grande número de harmônicas.
- ◆ no item d vemos um sinal não periódico: o espectro de frequências não acusa valores específicos de frequências, pois estes seriam em número infinito. Assim, apenas é possível obter-se a densidade espectral de energia.

Com essas colocações, podemos definir agora o que é ruído. Trata-se de um som indesejável, não periódico, que não é possível montar o seu espectro de frequências, mas apenas a densidade espectral.

6. - O Ruído

A definição de ruído é um tanto ambígua. De um modo geral pode ser definida como um som indesejável. Assim vamos apresentar duas definições para o ruído :

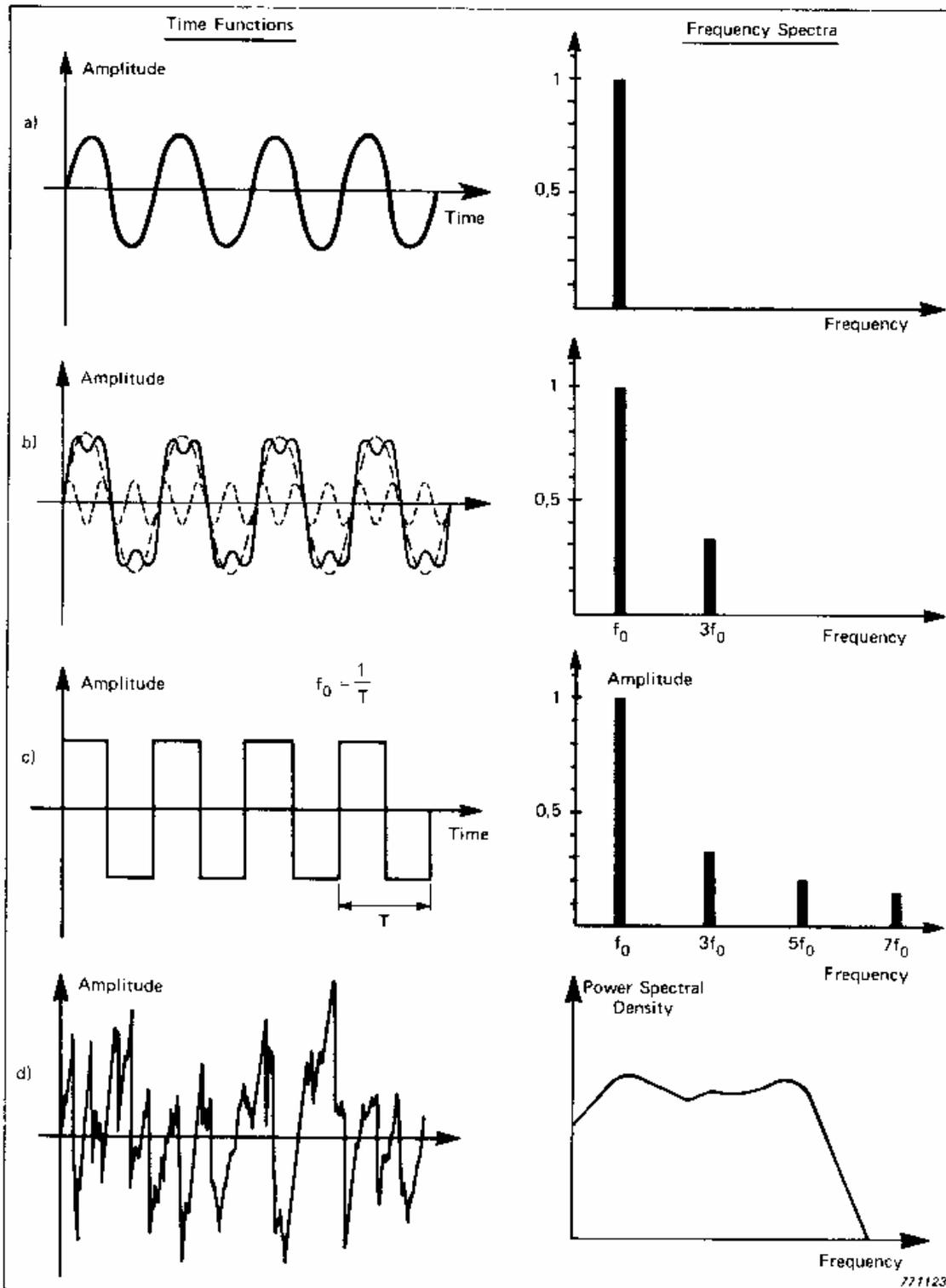


Figura 2.12 - Espectro e densidade espectral de sons.



Definição Subjetiva : *Ruído é toda sensação auditiva desagradável ou insalubre.*

Definição Física : *Ruído é todo fenômeno acústico não periódico, sem componentes harmônicos definidos.*

Fisicamente falando, o ruído é um som de grande complexibilidade, resultante da superposição desarmônica de sons provenientes de várias fontes. Seu espectro sempre será uma confusa composição de harmônicas sem qualquer classificação ou ordem de composição. Normalmente seu espectro é de banda larga (de frequências), compacto e uniforme, sendo comum aparecer uma maior predominância de uma faixa de frequências (graves, médias ou agudas). O espectro de frequências de um ruído tem um difícil interpretação, preferindo-se a densidade espectral. (Figura 1.13).

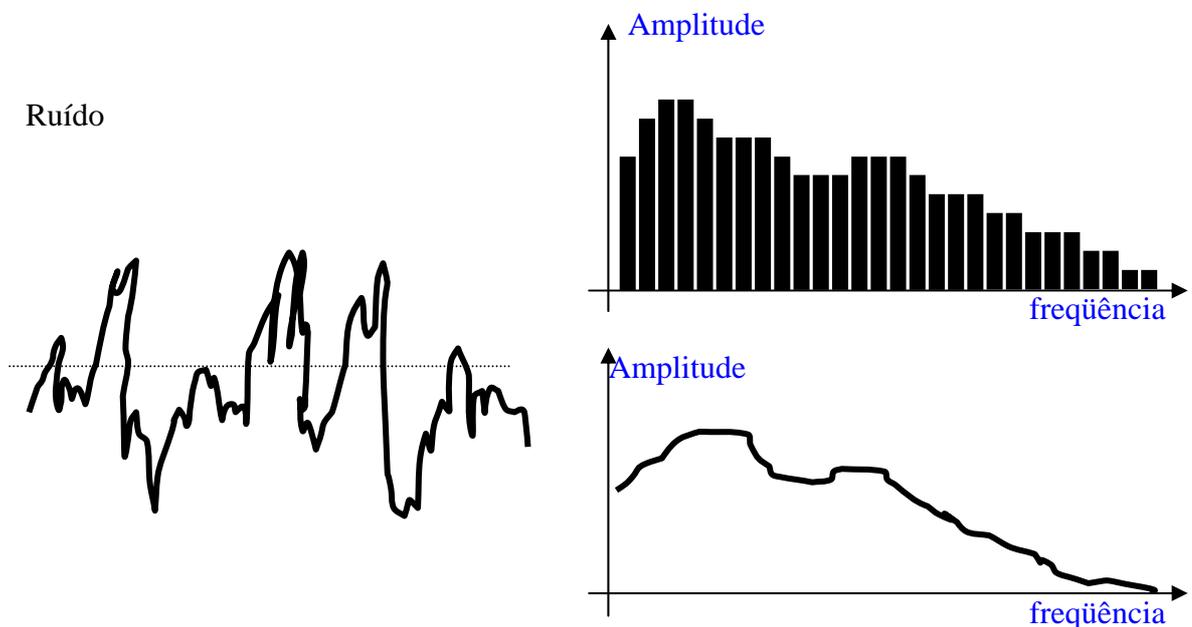


Figura 1.13: Espectro e densidade espectral de um ruído

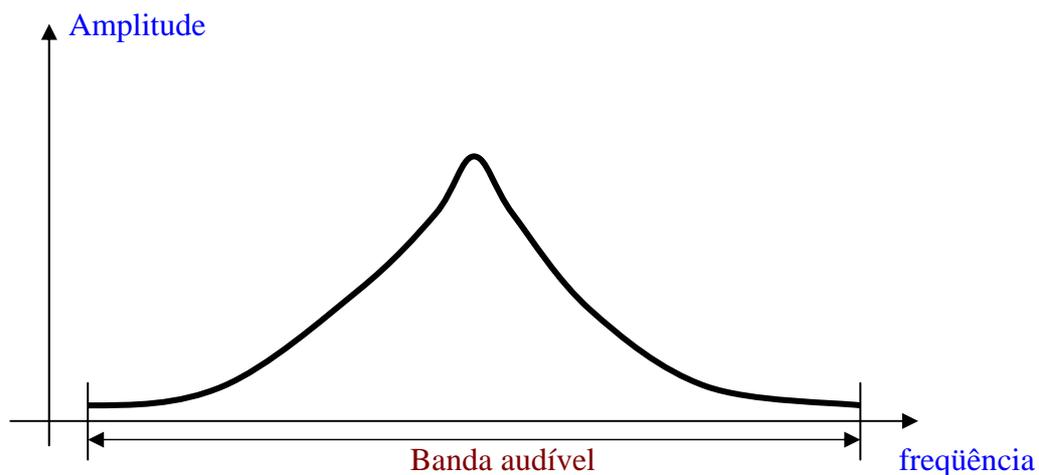
Nas últimas décadas os ruídos se transformaram em uma das formas de poluição que afeta a maior quantidade de pessoas. A partir de 1989 a Organização Mundial da Saúde já passou a tratar o ruído como problema de saúde pública

Nos próximos capítulos estudaremos, em detalhes, todos os aspectos do ruído.

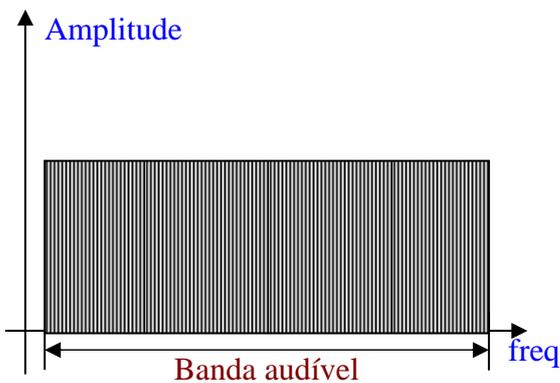
7. - Os Ruídos padronizados usados em ensaios

Por conter um grande número de frequências, alguns ruídos foram padronizados, sendo usados em testes e calibração de equipamentos eletroacústicos. Os principais são:

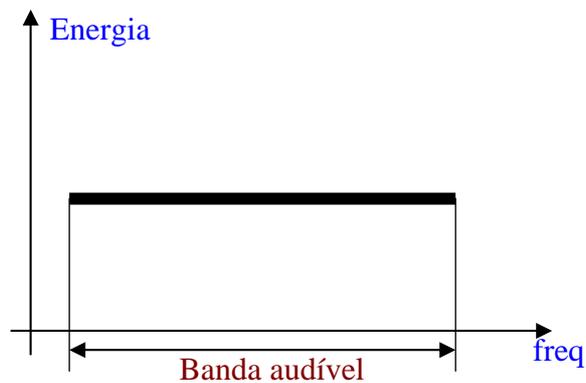
- **Ruído aleatório** – É o ruído cuja densidade espectral de energia é próxima da distribuição de gauss.



• **Ruído branco** – É o ruído cuja densidade espectral de energia é constante para todas as frequências audíveis. O som de um ruído branco é semelhante ao de um televisor ‘fora do ar’.

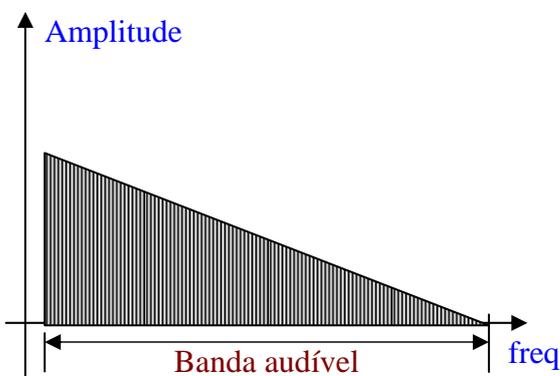


Espectro

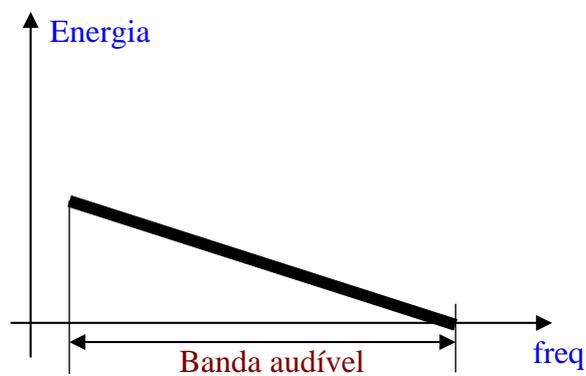


Densidade Espectral

• **Ruído Rosa** – É o ruído cuja densidade espectral de energia é constante para todas as frequências.



Espectro



Densidade Espectral

