

10- VELOCIDADE DO SOM

A velocidade do som pode ser expressa em termos da taxa de variação da densidade com a pressão. Escrevemos:

$$V^2 = \frac{\Delta p}{\Delta \rho}$$

Ocorre que a taxa de variação da pressão depende da natureza do processo que deu origem à perturbação. Em geral, consideramos dois tipos de processos dando origem à perturbação de pressão num fluido. Processos isotérmicos e adiabáticos. Temos assim duas velocidades possíveis. Quando a perturbação é gerada de tal forma que o processo ocorre a temperatura constante, a velocidade é dada pela variação definida acima, considerando-se a temperatura constante:

Abaixo, segue uma tabela da velocidade do som em diferentes meios.

Meio	Velocidade(m/s)
Ar(0°C)	331
Ar(20°C)	343
Helio	965
Hidrogênio	1284
Água (0°C)	1402
Água (20°C)	1482
Água do mar	1522
Alumínio	6420
Aço	5941
Granito	6000

Fig. 1- Velocidade do som em diferentes meios.

10.1- Frequência e período de ondas sonoras

Já nos referimos aos conceitos de período e frequência de ondas harmônicas. No entanto ondas sonoras, como aquelas produzidas por instrumentos musicais, são constituídas por uma superposição de ondas harmônicas. Nesse caso o período da onda (símbolo T) é definido como o tempo requerido par completar um ciclo da vibração.



Fig. 2- Uma onda periódica produzida por um instrumento musical.

A unidade mais utilizada para aplicações envolvendo a fala é o milissegundo, ms, definido assim:

$$1 \text{ ms} = 1/1,000 \text{ s} = 0.001 \text{ s} = 10^{-3} \text{ s}$$

Outra unidade utilizada é o microsegundo (μs):

$$1\mu\text{s} = 1/1,000,000 \text{ s} = 0.000001 \text{ s} = 10^{-6} \text{ s}$$

Frequência (símbolo ν) é definida como o de ciclos completados em um Segundo. É uma medida da taxa de vibração. Ela é medida na unidade hertz (Hz) que é o inverso da unidade de tempo Segundo. Ou seja,

$$1\text{Hz} = 1/\text{s}$$

A frequência é o conceito mais importante na ciência da audição. Ela é dada pelo inverso do período:

$$\nu = \frac{1}{T}$$

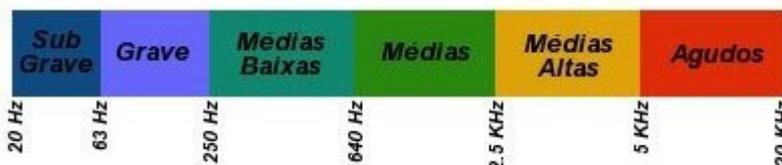


Fig. 3- Espectros de frequência.

10.2- Altura do Som

A Altura do Som (pitch, em inglês), é a característica que nos permite distinguir os diferentes sons. Em particular, distinguir os sons agudos dos sons graves. Hooke demonstrou experimentalmente que a Altura do Som é o mesmo que a sua frequência.

Conversações acontecem com frequências abaixo de 2000 Hz. A voz humana produz sons cujas frequências se situam no intervalo entre 120 Hz e 1100 Hertz. O choro de uma criança está no intervalo entre 2000 e 3000 Hz.

10.3- Sons Harmoniosos

Dizemos que dois sons são harmoniosos quando suas frequências estão numa relação da forma:

$$\frac{\nu_1}{\nu_2} = \frac{n_1}{n_2}$$

Onde n_1 e n_2 são números inteiros.

À razão entre duas frequências ν_1 e ν_2 damos o nome de **intervalo** entre duas notas musicais.

Esta relação entre frequências de sons que nos dão prazer e os números inteiros já era conhecida de Pitágoras, que viveu no século VI A.C. Fez essa inferência ao estudar os sons produzidos por instrumentos de corda. Sua escola de pensamento, os pitagóricos, levou muito a sério os números inteiros. Pitágoras preconizava a ideia de que “todas as coisas são números”, e essa é à base da escola pitagórica.

Os sons que se nos parecem mais prazerosos são aqueles para os quais a relação entre as frequências estão numa proporção envolvendo os números inteiros 4,5 e 6. Nessas circunstâncias o som forma um **acorde perfeito maior**. Um dia a neurociências poderá prover uma explicação para essa nossa preferência, em termos de sentimento de prazer, por sons harmoniosos.

10.4- Notas e Escalas Musicais

Notas musicais são sons com determinadas frequências. Elas foram definidas seguindo convenções que foram sendo estabelecidas ao longo do tempo. Eles são agrupados em escalas musicais.

Escala musical se refere a um conjunto de notas ordenadas a partir de uma frequência fundamental. Elas são classificadas de acordo com o número de notas por oitava. 8 (Octatonica) 7 (heptatonica ou natural, 6 3 e até mesmo 1 (a escala monotonica).

Nota	dó	ré	mi	fá	sol	lá	si	dó
ν_n / ν_1	1	9/8 (segunda)	5/4 (terça)	4/3 (quarta)	3/2 (quinta)	5/3 (sexta)	15/8 (sétima)	2 (oitava)

Fig. 4- Escala natural.

Assim, existem muitas escalas musicais. Vamos falar de duas escalas delas. A primeira, denominada “escala natural” é baseada na divisão de uma oitava em 7 notas (Dó, Ré, Mi, Fá, Sol, Lá e Si). A segunda escala denominada “de igual temperamento”, e adotada no século VXIII, é baseada em doze notas. Acrescentam-se os “sustenidos” de Dó#, Ré#, Fá#, Sol# e Lá#. A frequência absoluta escolhida numa convenção internacional é aquela associada à volta Lá de frequência 440 hz.

Na escala de igual temperamento nota de frequência f é dada pela expressão.

$$f = 2^{n/12} 440 \text{ Hz}$$

Com n sendo um numero inteiro, positivo ou negativo. Com isso, uma oitava é dividida em 12 intervalos (denominados semitons temperados).

Nota	Dó	Dó#	Ré	Ré#	Mi	Fá	Fá#	Sol	Sol#	Lá	Lá#	Si
Intervalo temperado	1,0000	1,0595	1,1225	1,1892	1,2600	1,3348	1,4142	1,4983	1,5874	1,6818	1,7818	1,8877
Intervalo natural	1,0000		1,1250 = 9/8		1,250 = 5/4	1,3333 = 4/3		1,5000 = 3/2		1,6666 = 5/3		1,8750 = 15/8

Fig. 5- Escala de igual temperamento.

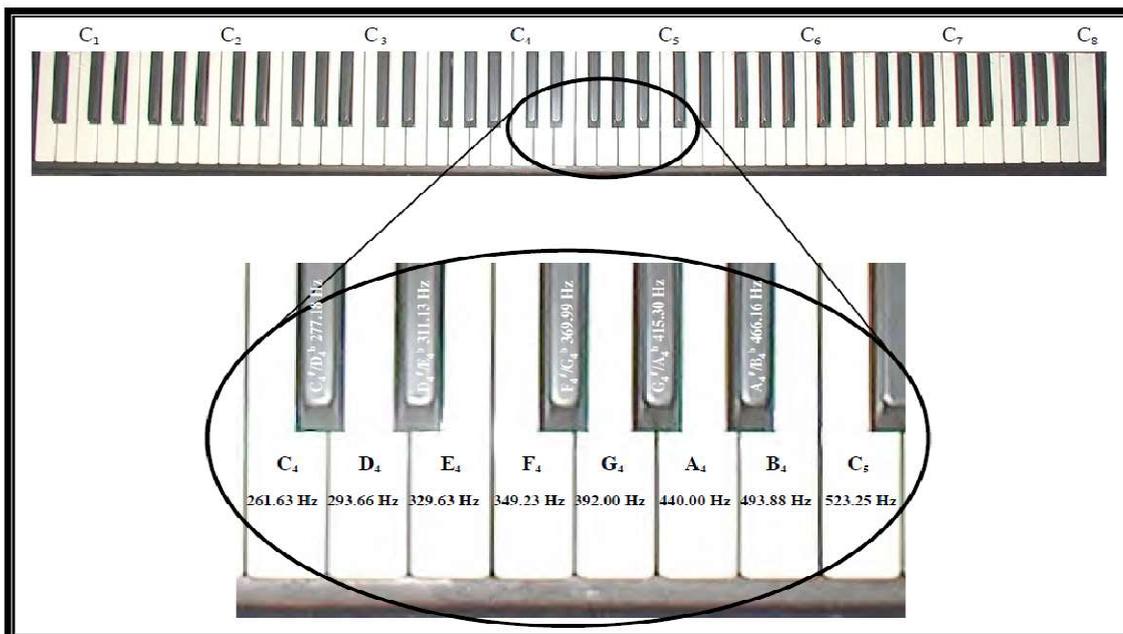


Fig. 6- A natureza repetida da escala musical é ilustrada em um teclado de piano.

Outro conceito importante, no mundo da música, é o conceito de **Oitava**. Oitava se refere à duplicação da frequência. Por exemplo, um som de frequência 100 Hz é uma oitava mais alta (no sentido de frequência) do que um som de 50 Hz. O ouvido é sensível a um domínio de 10 oitavas.



Fig. 7- Notas musicais de uma partitura.

10.5- Diferenças Notáveis e Batimento

Até que ponto somos capazes de distinguir diferenças de frequências? Isso nos leva ao conceito de **diferenças notáveis** do som. A diferença notável da frequência é expressa em Hertz. Ela estabelece qual a diferença entre frequências que somos capazes de distinguir entre sons periódicos. A diferença notável é de 1Mz para frequências abaixo de 1000 Hz. E ela cresce à medida que as frequências aumentam, podendo chegar até 10 Hz para frequências próximas de 4000 Hz. Isso significa que dois tons de 400 e 4001 Hz podem ser distinguidos pelos sentidos da audição.

10.6- Intensidade do Som

A intensidade de uma onda é definida como a taxa média, por unidade de tempo e de área, com que energia é transportada pela mesma. Assim definimos intensidade para ondas sonoras

Consequentemente a Intensidade de uma onda sonora pode ser escrita como:

$$I = \frac{P_o^2}{2\rho_0V}$$

Onde P_o é a máxima pressão da onda, ρ_0 é a densidade do fluido no qual a onda se propaga e V é a velocidade da onda

Ou seja, a intensidade depende do quadrado da amplitude da onda de deslocamento, ou do quadrado da amplitude da onda de pressão.

O limiar de audibilidade, definida como a intensidade mínima que os órgãos da audição têm condições de processar (ou seja, de converter essa energia mecânica em energia elétrica), é:

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

Enquanto que o limiar da sensação dolorosa é de 14 ordens de magnitude maior do que o limiar de audibilidade. Ou seja, a intensidade sonora máxima (I_m) que podemos tolerar é:

$$I_m = 10^2 \frac{W}{m^2}$$

A unidade de intensidade das ondas sonoras é denominada decibel. Nesse caso, a intensidade varia de 0 a 140.

Approximate sound levels and intensities within human hearing range

Source of sound	Intensity level (dB)	Intensity ($W m^{-2}$)	Perception
jet plane at 30 m	140	100	extreme pain
threshold of pain	125	3	pain
pneumatic drill	110	10^{-1}	very loud
siren at 30 m	100	10^{-2}	
loud car horn	90	10^{-3}	loud
door slamming	80	10^{-4}	
busy street traffic	70	10^{-5}	noisy
normal conversation	60	10^{-6}	moderate
quiet radio	40	10^{-8}	quiet
quiet room	20	10^{-10}	very quiet
rustle of leaves	10	10^{-11}	
threshold of hearing	0	10^{-12}	

A tabela acima apresenta alguns valores da intensidade de alguns sons. Observe-se que temos sensibilidade para uma gama de valores de intensidades considerável. Considerando-se o caso de estarmos a 30 metros de um jato, a intensidade desse som é 10^{14} vezes maior que o limiar de audibilidade. Trata-se de algo surpreendente.