INSTITUTO DE FÍSICA

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

AUDIÇÃO HUMANA

J. H. Vuolo e H. Franco

2ª Edição

FMT - 0463

2004

Prefácio

Este texto foi escrito para a disciplina Física Aplicada (FMT463). *As informações foram bastante compactadas, a partir da bibliografia citada. O texto deve ser estudado pelos alunos da disciplina, mas dificilmente as aulas ou o esclarecimento de dúvidas com o professor serão dispensáveis.*

Agradecimentos ao Prof. Aluisio N. Fagundes, *pela grande ajuda com o computador e com os programas, usados na edição da apostila.*

São Paulo, 10 de Agôsto de 1997

J. H. Vuolo e H. Franco

AUDIÇÃO HUMANA

J. H. Vuolo e H. Franco

1 Propagação de ondas sonoras

1.1 Velocidade das ondas sonoras

A onda sonora é uma onda longitudinal de pressão que pode se propagar em gases, líquidos e sólidos[1].

Se p_o é a pressão do meio material não perturbado, a onda pode ser descrita como uma *perturbação* p *na pressão,* de forma que a pressão total em cada ponto é $(p_o + p)$. Nos casos mais simples, pode-se utilizar modelo unidimensional que se aplica a onda se propagando num meio tal como um tubo ou uma barra ou, ainda, para onda plana. A onda plana é importante, uma vez que é sempre uma aproximação para onda esférica, em pontos distantes da fonte.

No caso de onda se propagando na direção-x, pode-se mostrar[2] que a *perturbação* p *na pressão* satisfaz à equação de onda:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \qquad \text{onde} \qquad v = \sqrt{\frac{B}{\rho_o}}\,, \tag{1}$$

sendo ρ_o a densidade do meio não perturbado e B o módulo de elasticidade volumétrica[3], definido como a razão entre a variação de pressão p e a *variação fracional* $(-\delta V/V)$ no volume:

$$B = \frac{p}{-(\delta V/V)}\,. \tag{2}$$

Quanto "mais rígido" (menos compressível) for o meio material, tanto maior é o parâmetro B.

[1]No caso de sólidos, a onda pode envolver também vibrações transversais. A propagação de ondas sonoras é discutida nas Referências 1, 2 e 3. As Referências de 4, 5, 6, 7, 8 e 10 são textos sobre a audição humana.

[2]Ver Referência 1 e 2, por exemplo.

[3]No caso de sólidos, B é chamado *módulo de Young.*

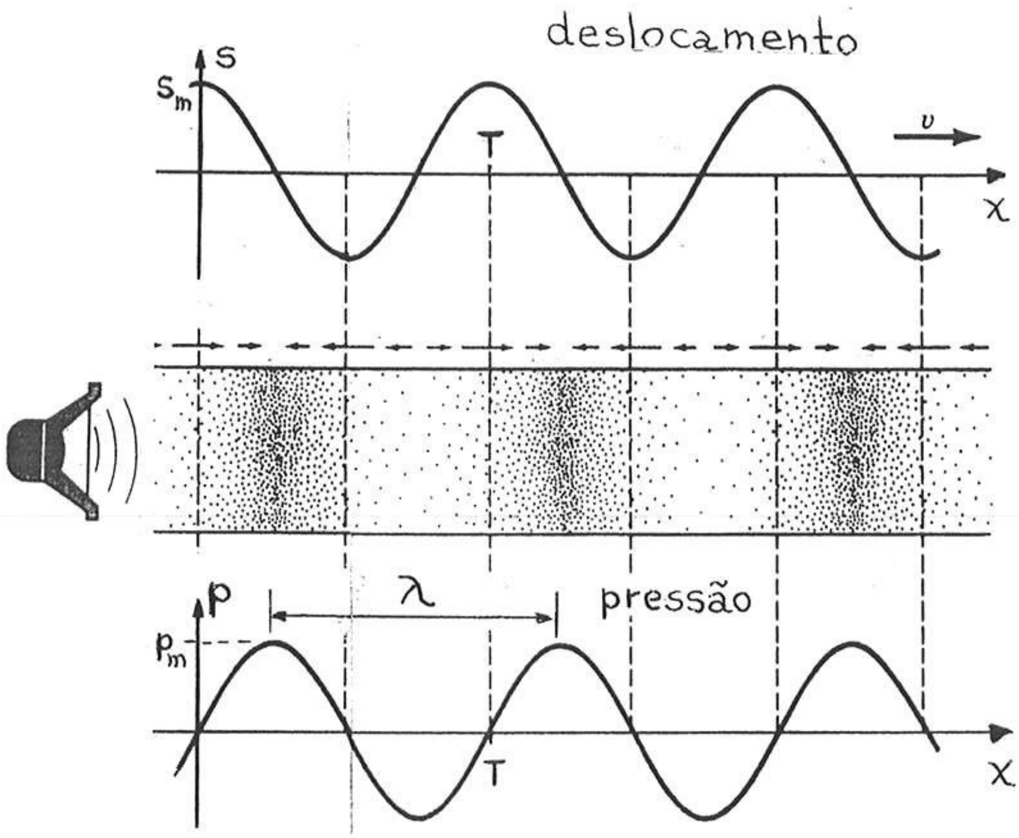

Figura 1: *Onda sonora na direção-x. A onda pode ser representada como uma onda de pressão (p) ou como uma onda de deslocamento das partículas (s).*

Tabela 1: Velocidades e impedâncias acústicas para alguns materiais

Meio	Velocidade v (m/s)	Impedância acústica w ($kg\,m^{-2}\,s^{-1}$)	Temperatura
Ar	343	0,000431 $\times 10^6$	$20^o\,C$
Hidrogênio	1330	0,000116 $\times 10^6$	$20^o\,C$
Etanol	1162	0,917 $\times 10^6$	$20^o\,C$
Água	1482	1,48 $\times 10^6$	$20^o\,C$
Glicerina	1860	2,34 $\times 10^6$	$20^o\,C$
Chumbo	2160	24 $\times 10^6$	$20^o\,C$
Alumínio	6374	17 $\times 10^6$	$20^o\,C$

As soluções da equação de onda são ondas harmônicas se propagando nos sentidos $+x$ e $-x$. A onda progressiva no sentido positivo do eixo ($+x$) pode ser representada por (Figura 1) :

$$p = p_m \, sen\,(kx - \omega t), \tag{3}$$

onde k é a constante de propagação e ω é a frequência angular, relacionados com o comprimento de onda λ, com a frequência ν e com o período T:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad \text{e} \quad \omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi}{T}, \tag{4}$$

A velocidade de fase da onda é $\omega/k = \lambda\nu$. Assim, resulta da Equação 1 que v é a velocidade de fase da onda:

$$v = \lambda\nu = \sqrt{\frac{B}{\rho_o}}, \tag{5}$$

Assim, a velocidade das ondas sonoras depende das propriedades elásticas do meio e da densidade. A Tabela 1 mostra alguns exemplos de velocidades de ondas sonoras. Como regra geral, as velocidades são maiores nos sólidos, menores nos líquidos e muito menores nos gases.

A Figura 2 mostra o espectro de ondas sônicas e alguns fenômenos típicos associados. A frequências e comprimentos de onda no ar são indicados.

1.2 Energia transportada pela onda sonora

Uma onda sonora progressiva transporta energia. A *intensidade da onda sonora* é a taxa de transporte de energia numa área unitária normal à direção de propagação. Resumidamente, é a potência transferida por unidade de área, dada em W/m^2. A intensidade é relacionada com a amplitude máxima da onda pela relção[4]:

$$I = \frac{1}{2}\frac{p_m^2}{\rho_o v}. \tag{6}$$

A onda sonora também pode ser descrita como uma onda de deslocamento de matéria:

$$s = s_m \cos(kx - \omega t). \tag{7}$$

[4] Ver Referências 1 e 2, por exemplo.

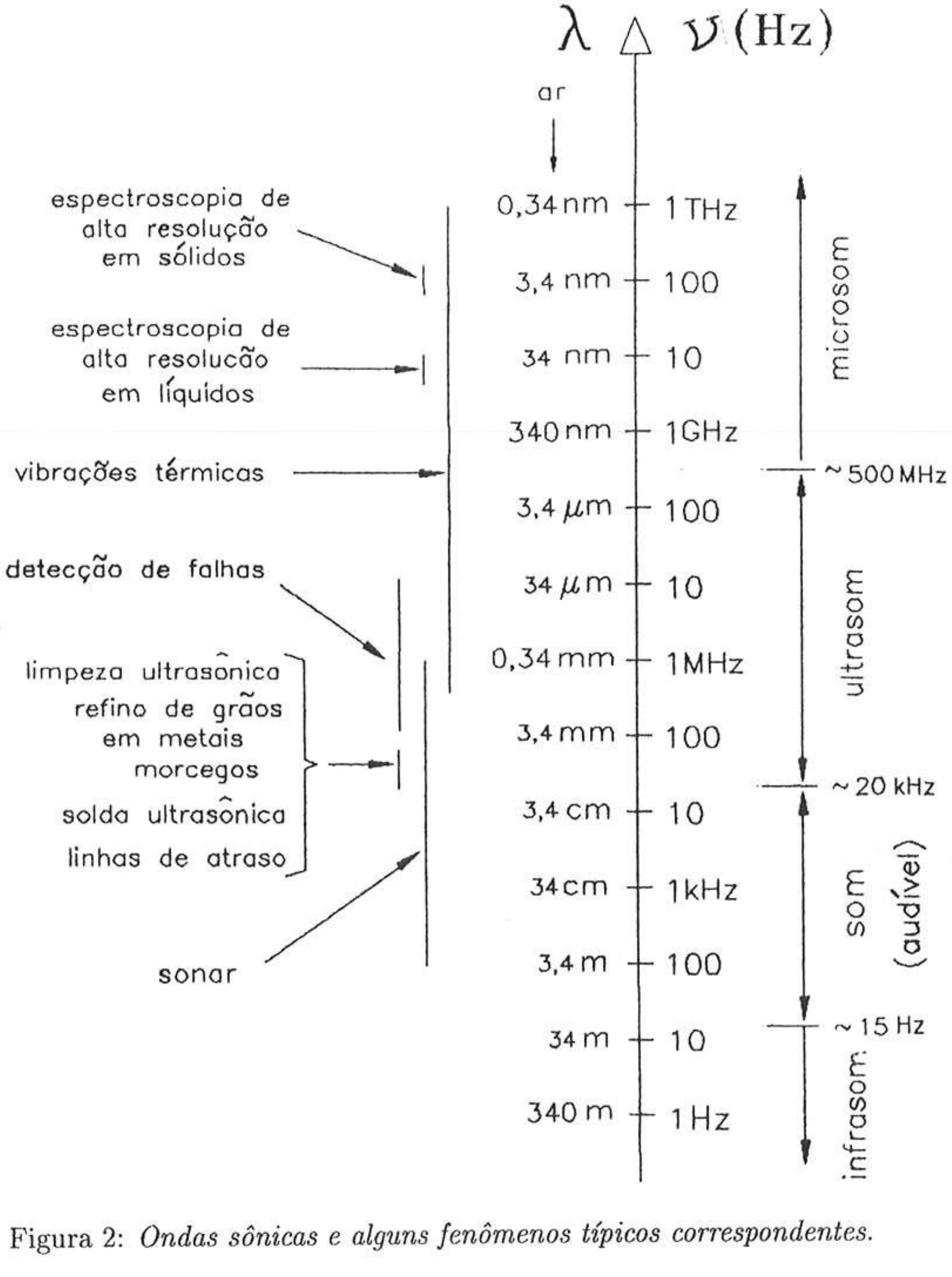

Figura 2: *Ondas sônicas e alguns fenômenos típicos correspondentes.*

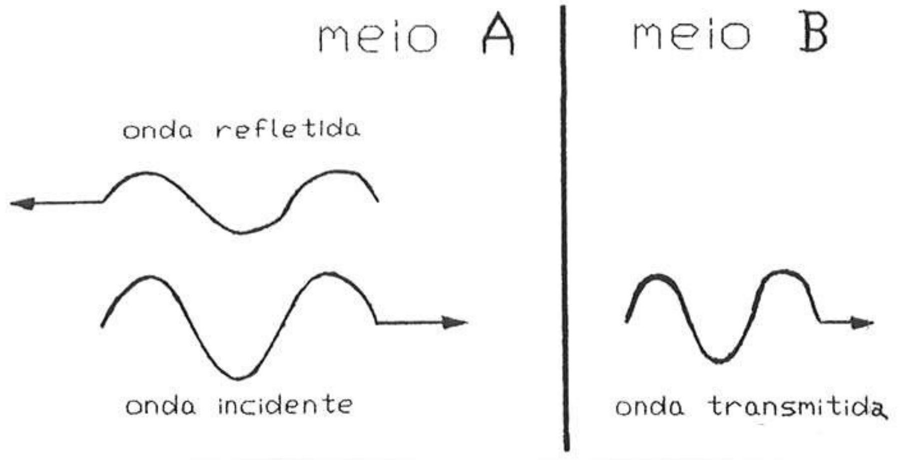

Figura 3: *Reflexão de onda sonora.*

Em termos do deslocamento máximo s_m, a intensidade da onda sonora é dada por

$$I = \frac{1}{2}\omega^2 \rho_o v s_m^2 . \tag{8}$$

Os deslocamentos envolvidos são muito pequenos, em geral. No limiar de audição, para frequência de $1\,kHz$, a intensidade é $I_o = 10^{-12}\,W/m^2$ e resulta da equação[5] acima $s_m \approx 1,1 \times 10^{-11}\,m = 0,011\,nm$. Tais deslocamentos são muito menores que as próprias dimensões atômicas e, portanto, são deslocamentos extremamente pequenos. Mesmo para altas intensidades sonoras, os deslocamentos são bastante pequenos. Para a máxima intensidade aceitável para o ouvido humano ($I \sim 1\,W/m^2$), $s_m \approx 10^{-5}\,m = 10\,\mu m$.

1.3 Reflexão de ondas sonoras

Quando a onda sonora se propaga de um meio A para um meio B, existe reflexão da onda. O coeficiente de reflexão R é definido como a razão entre as intensidades da onda refletida e da onda incidente. Na Figura 3 considera-se o caso em que a onda incidente é normal à superfície que separa os meios.

[5]Ver Questão 1.

O coeficiente de reflexão é dado por[6]

$$R = \left[\frac{w_A - w_B}{w_A + w_B} \right]^2, \tag{9}$$

onde w_A e w_B são as *impedâncias acústicas* dos meios A e B definidas por

$$w_A = \rho_A v_A \qquad \text{e} \qquad w_B = \rho_B v_B . \tag{10}$$

A Tabela 1 mostra exemplos de valores para impedâncias acústicas. O coeficiente de transmissão T é definido de maneira análoga com relação à intensidade transmitida. Devido à conservação de energia,

$$R + T = 1 \qquad \text{e} \qquad T = 1 - R = \frac{4\, w_A\, w_B}{(w_A + w_B)^2} . \tag{11}$$

A Equação 9 mostra que sempre existe reflexão da onda sonora ao passar de um meio a outro, exceto *quando as impedâncias acústicas dos meios são iguais*. Por outro lado, quando as impedâncias acústicas são muito diferentes, as Equações 9 e 11 mostram que a onda é essencialmente refletida e a fração transmitida é muito pequena.

2 Grandezas acústicas e audiométricas

A intensidade de uma onda sonora em W/m^2 é dada pelas Equações 6 ou 8. Entretanto, a intensidade é usualmente indicada em *decibel* (dB). O *nível de intensidade sonora*[7] em db é definido por

$$\beta\,(\,dB\,) = 10\, log_{10} \frac{I}{I_o} \qquad \text{onde} \qquad I_o = 10^{-12}\, W/m^2. \tag{12}$$

Esta intensidade $I_o = 10^{-12}\, W/m^2$ é, aproximadamente, o limiar de audição humana em $1000\, Hz$ e corresponde a $0\, dB$.

A Tabela 2 mostra exemplos de fontes sonoras e respectivas intensidades sonoras. Os valores em dB devem ser entendidos apenas como ordens de grandeza para as intensidades sonoras, inclusive porque essas intensidades dependem diretamente da distância à fonte sonora.

O nível de intensidade sonora (W/m^2 ou dB) é uma grandeza acústica puramente física, relacionada com a energia transportada pela onda.

[6] A expressão é deduzida a partir de condições de contorno para as grandezas envolvidas na interface entre os meios (Ver Referência 2, por exemplo).

[7] "sound intensity level" (SIL).

Tabela 2: Exemplos de intensidades sonoras

Fonte sonora	β (dB)	I/I_o
Limiar de audição	0	1
Mais fracos sons audíveis	10	10^1
Conversa muito baixa a $1\,m$	20	10^2
Rua silenciosa	30	10^3
Música baixa	40	10^4
Escritório comum	50	10^5
Conversa alta a $1\,m$	60	10^6
Motor de caminhão	70	10^7
Rua barulhenta com trânsito	80	10^8
Britadeira pneumática	90	10^9
Buzina automotiva	100	10^{10}
Grupo de rock	110	10^{11}
Turbina de jato grande a $\sim 30\,m$	120	10^{12}
Limiar de dor	120 a 130	10^{12}
Foguete espacial grande	200	10^{20}
Explosão nuclear a $\sim 500\,m$	220	10^{22}

O ouvido humano pode captar sons entre $20\,Hz$ e $20\,kHz$, aproximadamente, e a sensibilidade não é a mesma em todas as frequências. A máxima sensibilidade fica em torno de $3{,}5\,kHz$. Para frequências menores ou maiores, a sensibilidade diminui e se torna extremamente baixa fora dos limites acima. Assim, sons em diferentes frequências e com mesmo *nível de intensidade sonora* são percebidos pelo sistema auditivo com diferentes "volumes". Por isso, define-se o *nível de volume sonoro* ("loudness level"), que caracteriza a sensação de volume sonoro percebida pelo sistema auditivo. A unidade para o nível de volume sonoro é chamada *phon* e é definida a seguir.

> Um determinado som tem nível de volume sonoro de X *phons* se este som é percebido pelo sistema auditivo com mesmo volume que um som em $1000\,Hz$ e nível de intensidade sonora de $X\,dB$.

Assim, na frequência de $1\,kHz$ o número de *phons* é, por definição, igual ao número de dB. Nas demais frequências, é necessário conhecer a resposta

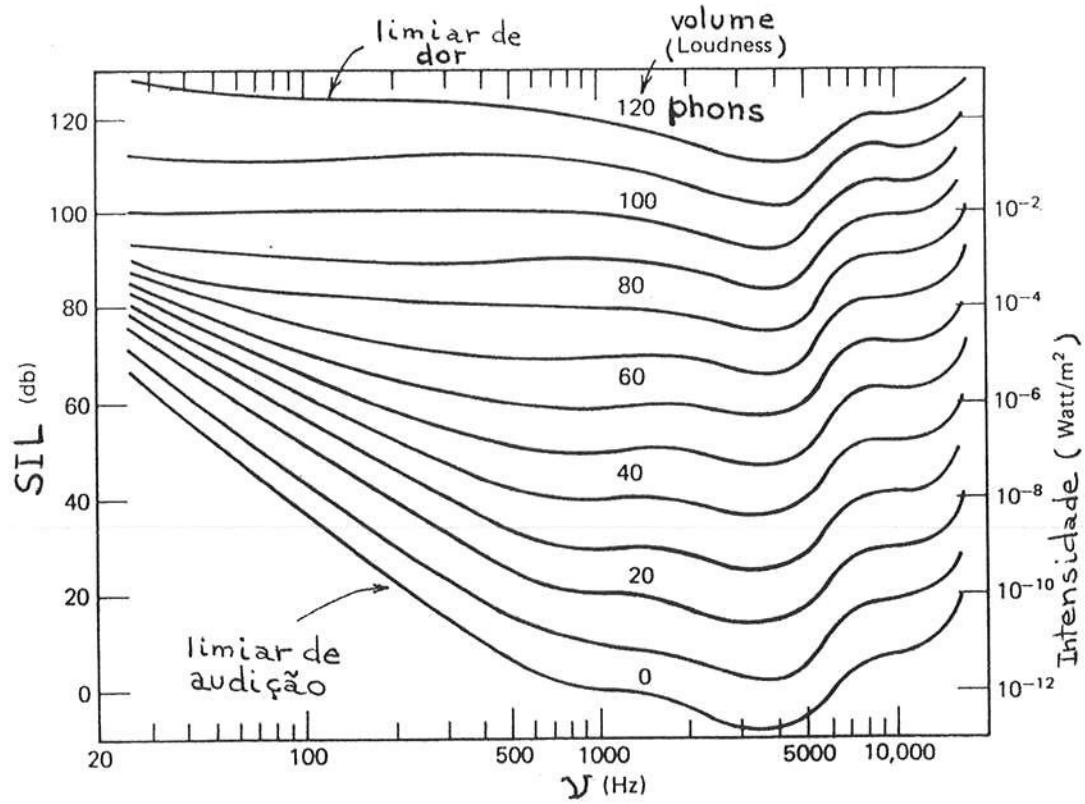

Figura 4: *Curvas de nível de volume sonoro constante em função da frequência. Por definição, o número de phons coincide com o número de dB em 1000 Hz.*

do sistema auditivo. A maneira usual de apresentar esta resposta é por meio das curvas de *nível de volume sonoro constante*, chamadas *curvas de Fletcher-Munson,* mostradas na Figura 4. Essas curvas permitem determinar para qualquer frequência, o nível de volume sonoro em função do nível de intensidade sonora e vice-versa.

Por exemplo, considerando um som de $50\,dB$ em $120\,Hz$, o ponto A correspondente está localizado aproximadamente na curva de $20\,phons$. Portanto, conforme a definição, este som tem um nível de volume sonoro de $20\,phons$.

A relação entre volume sonoro em *phon* e intensidade sonora em dB tem certa analogia com a relação entre o fluxo luminoso em *lúmen* e a intensidade luminosa em W/m^2. As unidades dB e W/m^2 são quantidades puramente físicas relacionadas com o fluxo de energia da onda sonora e da onda eletromagnética, respectivamente. As unidades *phon* e *lúmen* são quantidades psicofísicas relacionadas com os fluxos de energia e também com as respostas do sistema auditivo ou sistema visual, respectivamente. Por exemplo, um feixe de infravermelho de 1200 nm (completamente invisível) e muito intenso produz 0 *lúmen* porque não existe resposta do sistema visual. De maneira análoga, uma onda sônica muito forte em 25 kHz (ultrasom) produz 0 *phon* porque não existe resposta do sistema auditivo.

Em música, a expressão "altura" de um som se refere à frequência do som. Isto é, um som é tanto mais "alto" quanto maior a frequência (mais agudo). Analogamente, o som é tanto mais "baixo" quanto menor a frequência (mais grave). Estes termos não devem ser confundidos com as expressões "volume alto" ou "volume baixo" muito usadas no dia a dia.

3 Espectros de Fourier

As considerações anteriores se aplicam a sons de frequência ν bem definida, que são chamados *tons puros*. Na verdade, tais sons raramente ocorrem na prática, exceto em dispositivos cuidadosamente projetados para emitir tons puros ou em casos muito particulares[8]. Os sons que ocorrem usualmente são bastante complicados pois envolvem uma mistura de frequências.

A distribuição de frequências de um determinado som é chamada *espectro sonoro* ou *espectro de Fourier*. A Figura 5 mostra aproximadamente o espectro sonoro para uma nota tocada numa flauta. A Figura 6 mostra o espectro para uma nota tocada num violino.

Do ponto de vista matemático a determinação da distribuição de frequências para um determinado som é feita com a chamada "análise de Fourier". Este assunto não será discutido em detalhes aqui. Uma discussão qualitativa um pouco mais detalhada é apresentada nas Referências 4 e 5. Do ponto de vista quantitativo, as expressões básicas sobre análise de Fourier são apresentadas na Referência 9.

A seguir, é apresentado um breve resumo e as fórmulas básicas, acompanhados de alguns exemplos.

Uma função periódica $f(t)$, de período T, pode ser expandida como uma série de Fourier na forma,

$$f(t) \;=\; \frac{A_o}{2} \;+\; \sum_{n=1}^{n=\infty} \left(A_n \cos n\,\omega_o\,t \;+\; B_n \,sen\, n\,\omega_o\,t \right), \tag{13}$$

[8]Em certas circunstâncias particulares, insetos ou animais (grilos, morcegos, pássaros e outros) podem emitir sons bastante puros com finalidades especiais.

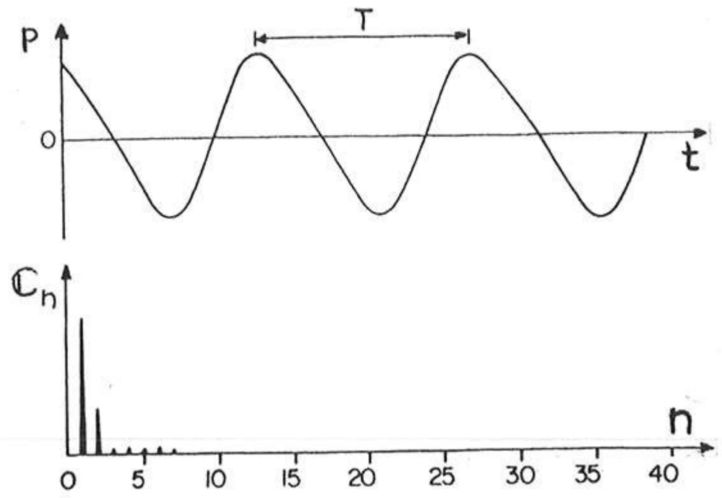

Figura 5: *Forma de onda e espectro de Fourier da nota Dó (523,25 Hz) tocada numa flauta (Referência 5).*

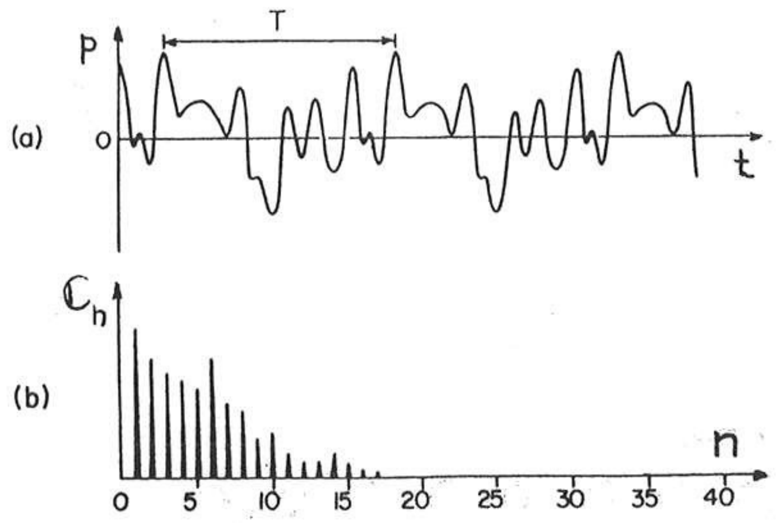

Figura 6: *Forma de onda e espectro de Fourier da nota Si (493,88 Hz) tocada num violino (Referência 5).*

onde $\omega_o = 2\pi\,\nu_o = \frac{2\pi}{T}$,

$$A_n = \frac{2}{T}\int_{t_o}^{t_o+T} f(t)cos(n\omega_o t)dt \quad \text{e} \quad B_n = \frac{2}{T}\int_{t_o}^{t_o+T} f(t)sen(n\omega_o t)dt. \tag{14}$$

Para uma função periódica $f(t)$ com valor médio nulo ($\overline{f(t)} = 0$ e $A_o = 0$) a Equação 13 pode ser escrita na forma

$$f(t) = \sum_{n=1}^{n=\infty} C_n\, cos\,(\,2\pi\, n\, \nu_o\, t\, +\, \phi_n\,) \tag{15}$$

Esta expressão mostra mais claramente que qualquer perturbação periódica pode ser entendida como superposição de perturbações harmônicas nas frequências ν_o, $2\nu_o$, $3\nu_o$ .... A componente de frequência mais baixa (ν_o) é chamada *fundamental*, enquanto as demais são chamadas 1ª harmônica, 2ª harmônica, 3ª harmônica e assim por diante.

O *Teorema de Parseval* estabelece que[9]

$$\frac{1}{T}\int_{t_o}^{t_o+T} (\,f(t)\,)^2\, dt \;=\; \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} (\,\frac{A_n^2}{2} + \frac{B_n^2}{2}\,) \tag{16}$$

A função $f(t)$ pode ser entendida como uma perturbação na pressão e a equação acima multiplicada por $1/(\rho_o v)$ .Neste caso, a Equação 16 mostra que os termos da somatória à direita representam as intensidades das componentes harmônicas. A identidade de Parseval pode ser interpretada como expressão do fato que a energia associada à perturbação é a soma das energias associadas às componentes harmônicas.

As Figuras 5 e 6 mostram exemplos de espectros de Fourier. A Figura 5 corresponde a um som relativamente puro, com uma frequência fundamental $\nu_o = 523,25\,Hz$, um harmônico na frequência $2\nu_o$ com intensidade quase 10 vezes menor e alguns harmônicos de intensidades desprezíveis. A Figura 6 mostra um som bastante "rico" em harmônicos.

O *timbre* é uma característica de um som complexo relacionada com a composição de harmônicos. Por exemplo, 2 sons complexos podem ter a mesma frequência fundamental e as mesmas frequências harmônicas, mas com intensidades de harmônicos bem diferentes. Neste caso, os timbres desses sons é que são bem diferentes.

[9]Se o valor médio da função não é nulo ($A_o \neq 0$), deve ser acrescentado $A_o^2/4$.

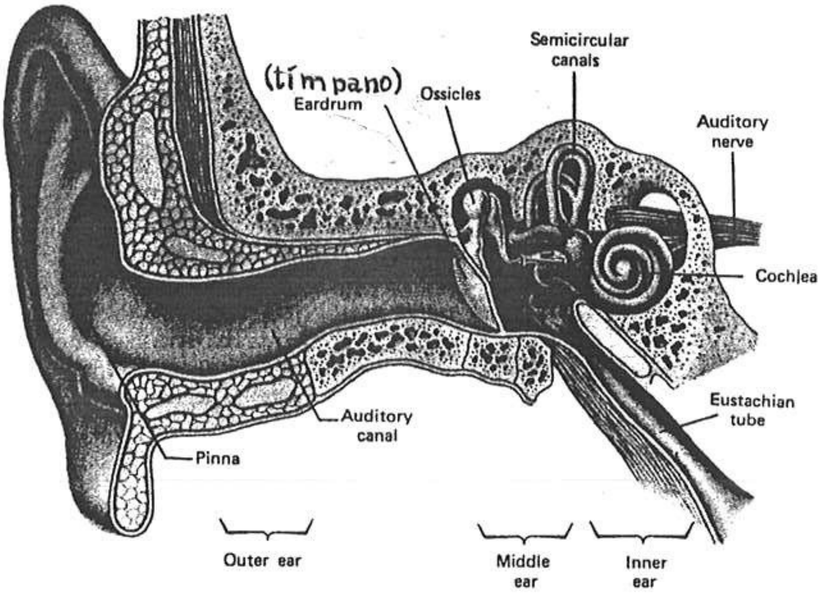

Figura 7: *Ouvido humano.*

4 Ouvido humano

4.1 Aspectos físicos

O ouvido humano é mostrado na Figura 7. O som é canalizado para o canal auditivo do ouvido externo e aciona a membrana chamada *tímpano* (eardrum), que oscila com as variações rápidas de pressão. O tímpano é acoplado a 3 ossículos (martelo, bigorna e estribo) que transmitem as vibrações à janela oval do ouvido interno.

Entre o ouvido externo e o interno fica o ouvido médio que contém ar na mesma pressão externa. Entretanto, não existe furo no tímpano e o equilíbrio das pressões externa e interna é feito de maneira bastante lenta, através da trompa de Eustáquio ligada à faringe.

O ouvido interno é preenchido com líquido, onde se encontram as células sensíveis a vibrações. Se o som fosse transmitido diretamente do ar para o líquido, a diferença de impedâncias acústicas tornaria extremamente reduzida a intensidade no interior do ouvido externo. Os ossículos constituem um sistema de alavanca que converte vibrações de pequenas amplitudes do tímpano em oscilações de pressão de grandes amplitudes no líquido. Assim, o tímpano

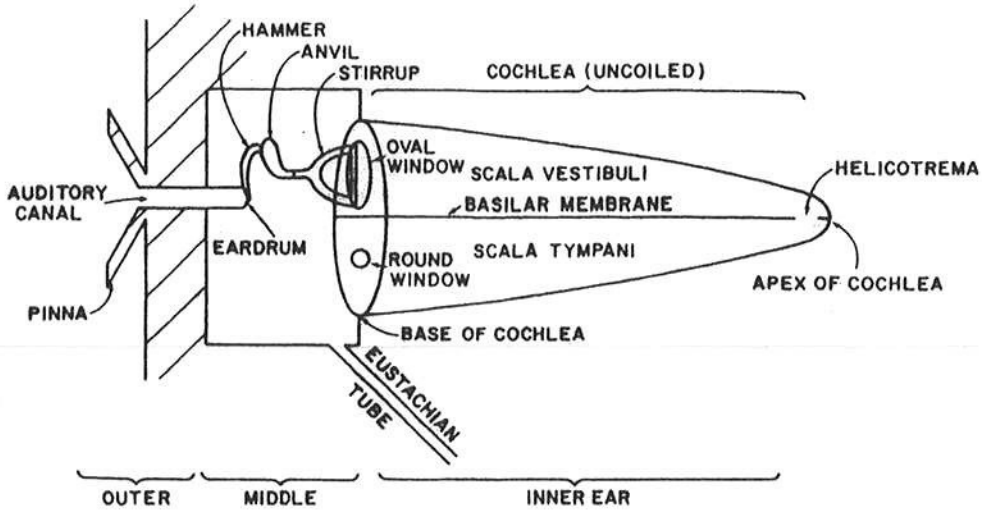

Figura 8: *Desenho esquemático da cóclea desenrolada.*

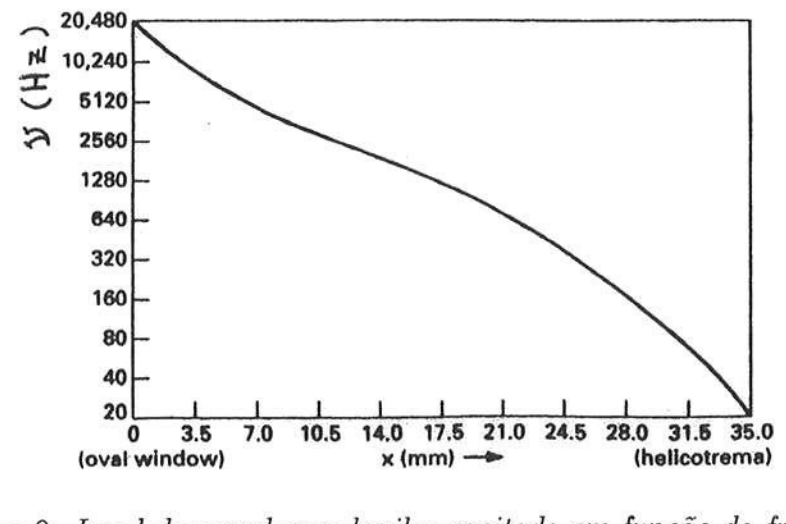

Figura 9: *Local da membrana basilar excitada em função da frequência.*

e os ossículos constituem um sistema eficiente de acoplamento acústico entre o ar e o líquido[10]. Além disso, existem músculos ligados aos ossículos, que têm a função de atenuar vibrações de grandes amplitudes que podem causar danos ao ouvido interno. Infelizmente, este mecanismo de proteção não é suficientemente rápido para prevenir danos no caso de sons muito intensos e rápidos tal como numa explosão próxima.

No ouvido interno existe a *cóclea,* que é um órgão de cerca de $3,5\,cm$ de comprimento e enrolado em forma de caracol. A Figura 8 é um desenho esquemático da cóclea "desenrolada". A estrutura da cóclea é bastante complicada, bem como o seu funcionamento, e estes aspectos não serão discutidos detalhadamente aqui[11].

As células sensíveis a vibrações chamadas *células ciliadas* (hair cells), que são ligadas ao cérebro por meio do nervo auditivo. Cerca de 30 000 células são distribuídas uniformemente ao longo da cóclea e são excitadas por vibrações na *membrana basilar*.

4.2 Resposta auditiva à intensidade sonora

A escala em decibel para medição de intensidade sonora é logarítmica porque isto está de acordo com a resposta do sistema auditivo. Isto é, a sensação auditiva é fortemente "atenuada", de maneira logarítmica, quando se aumenta a intensidade sonora. Por exemplo, se um som de $1000\,Hz$ é aumentado em etapas de 10 em $10\,dB$, o sistema auditivo percebe estas variações como sendo iguais em volume sonoro. Em resumo, o volume sonoro sofre aumentos constantes de $10\,phons$ em cada etapa. Entretanto, deve ser observado que a intensidade sonora é multiplicada por 10 em cada etapa.

A chamada *diferença apenas perceptível em intensidade* (JND-intensity)[12] é a menor variação de intensidade perceptível pelo sistema auditivo. Esta JND varia com a frequência de 0,5 a $1,5\,dB$ em todo espectro audível. Como ordem de grandeza pode ser considerada igual a $1\,dB$. Esta variação corresponde aproximadamente 25 % de variação na intensidade da ordem sonora. Como pode ser observado, uma variação bastante significativa de 25 % na intensidade pode não ser percebida pelo sistema auditivo. Isto é consequência da forte atenuação logarítmica da resposta do sistema auditivo.

[10]Ver Questão 3.

[11]Uma discussão um pouco mais detalhada pode ser obtida nas Referências 6 e 7.

[12]Just noticeable difference in intensity.

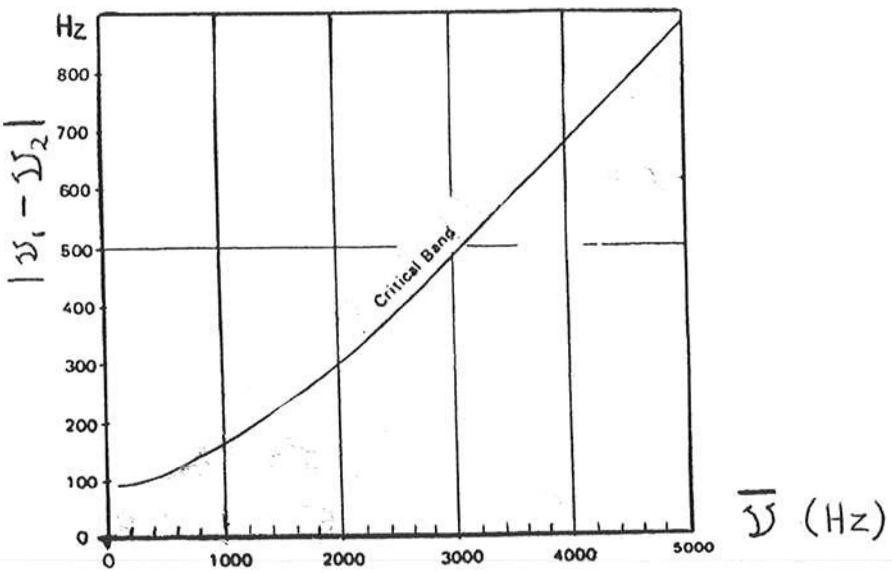

Figura 10: *Largura da banda crítica em função da frequência (Referência 8).*

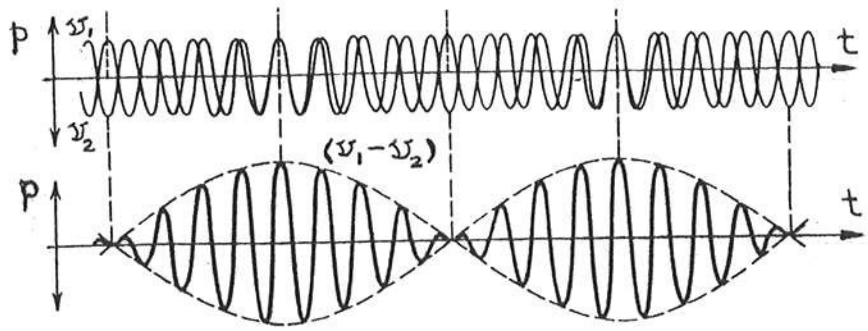

Figura 11: *Batimento entre duas ondas harmônicas.*

4.3 Identificação de frequências

4.3.1 Sons simultâneos

A Figura 10 mostra a chamada "largura da banda crítica" em função da frequência. Se 2 tons puros próximos, com frequências ν_1 e ν_2 ocorrem simultaneamente e a diferença $\Delta\nu = | \nu_1 - \nu_2 |$ é menor que essa largura, tais sons não são identificados como sons distintos. Tais sons são percebidos como um único som de frequência $(\nu_1 + \nu_2)/2$, mas ocorre variação de intensidade com frequência $\Delta\nu = | \nu_1 - \nu_2 |$. Isto corresponde ao fenômeno de *batimento*, mostrado na Figura 11.

A identificação de frequências podem ser explicada pela chamada *teoria da localidade*, proposta por Ohm e por Helmholtz no século XIX. Conforme esta teoria, diferentes frequências são distinguidas porque diferentes "locais" da membrana basilar (Figura 8) são excitados por frequências diferentes. A vibração da membrana basilar é captada pelas células ciliadas que, por meio do nervo auditivo, enviam sinais elétricos ao cortex auditivo (no cérebro).

A Figura 9 mostra a posição da membrana basilar que é excitada em função da frequência. Tons separados de *uma oitava* (fator 2 na frequência), excitam regiões da membrana basilar separadas de aproximadamente $3,5\,mm$. A membrana basilar tem cerca de $35\,mm$, o que corresponde aproximadamente às 10 oitavas de sensibilidade do ouvido humano (de $\approx\ 20\,Hz$ a $\approx\ 20\,kHz$)

Entretanto, a região da membrana basilar que é excitada para um tom puro é relativamente extensa, sendo cerca de $1{,}2\,mm$ em quase toda extensão da membrana basilar. Portanto, cerca de 1 300 células ciliadas são excitadas para um tom puro, o que corresponde a cerca de 15 % em frequência na maior parte do espectro audível.

Entretanto, se as frequências são suficientemente separadas, os tons excitam diferentes porções da membrana basilar e são percebidos como sons diferentes. Neste caso, a sensação auditiva de batimento devido à proximidade das frequências deixa de ocorrer.

4.3.2 Sons sequenciais

Para sons de frequências ν_1 e ν_2, não simultâneos, a discriminação de frequências é muito melhor. A *diferença apenas perceptível em frequência* (JND-frequency) é da ordem de 0,5 % da frequência, em quase todo espectro audível.

Por exemplo, se os sons são acionados em sequência, um depois do outro, diferenças na frequência da ordem de 0,5 % da frequência são perceptíveis. Isto pode ser explicado pelo fato que, embora a banda crítica excitada seja praticamente a mesma, a posição média da região excitada é diferente e o sistema auditivo é capaz de perceber isto.

A Figura 12 mostra valores da JND-frequency em função da frequência. Entretanto, deve ser observado que tais valores variam bastante de indivíduo para indivíduo conforme o treino musical e outros fatores, e também, conforme o método empregado na determinação.

A teoria da localidade é bastante difundida por ser bastante simples e, apenas disso conseguir explicar os aspectos mais importantes da discriminação

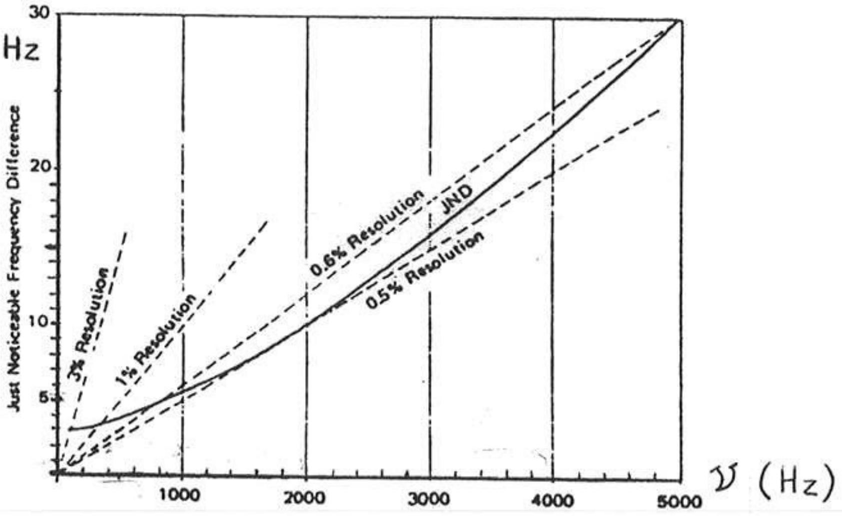

Figura 12: *Diferenças apenas perceptíveis na frequência (JND-frequency) em função da frequência do tom puro (Referência 8).*

de frequências pelo sistema auditivo. Entretanto, muitos detalhes da percepção de frequências não podem ser explicados por essa teoria. Uma outra teoria é a chamada "teoria da frequência", iniciada por Seebeck há mais de 100 anos. O princípio desta teoria é que a membrana basilar vibra como um todo, conforme o som incidente, tal como a membrana de um microfone. A discriminação de frequências ocorre a partir do padrão de excitação neural resultante. Uma discussão mais detalhada desta teoria e comparação com a teoria da localidade pode ser encontrada nas Referências 7 e 8.

Não existe uma teoria suficientemente desenvolvida e completa que permita entender todos os fenômenos complexos que ocorrem na discriminação de frequências. Conforme observado por Wever[13], uma teoria satisfatória, provavelmente incluirá aspectos de ambas as teorias.

4.4 Identificação binaural da direção da fonte sonora

A audição binaural[14] é o principal mecanismo para identificação da posição da fonte sonora. Com um único ouvido, a localização da fonte sonora é bem

[13]Referência 10.

[14]Na falta de opção melhor, a palavra "binaural" é usada como a análoga da palavra "binocular", no caso da visão estereoscópica.

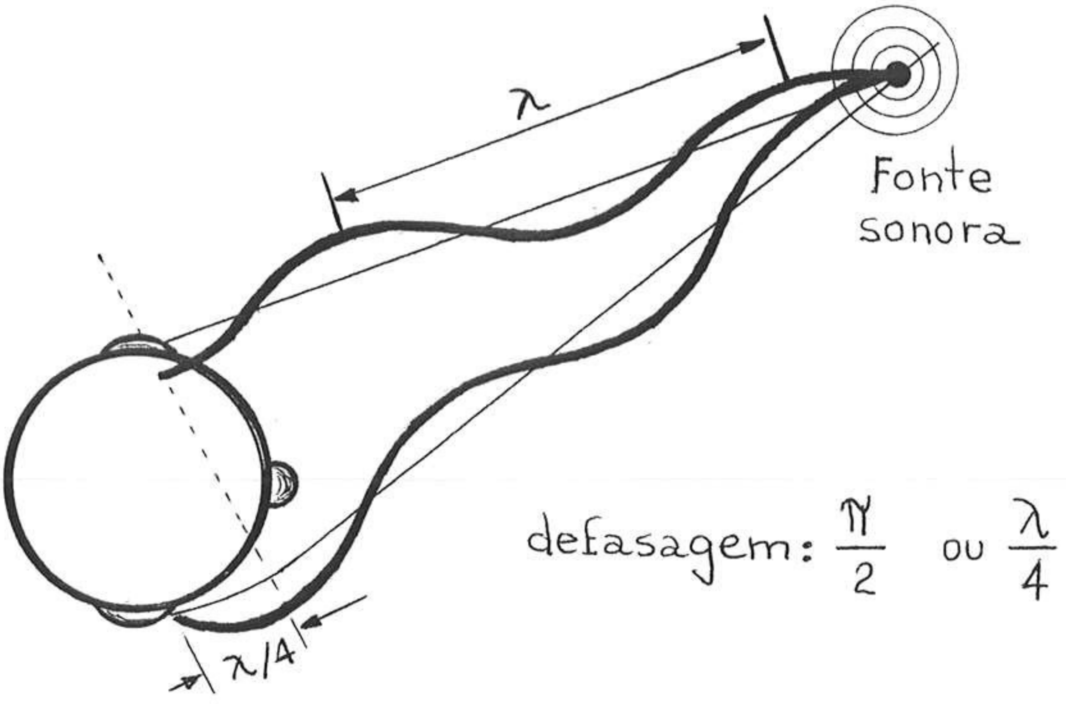

Figura 13: *Defasagem entre os sons recebidos pelos dois ouvidos.*

difícil e depende de movimentos da cabeça para identificar a direção de maior intensidade.

As vibrações que atingem os dois ouvidos, não se misturam fisicamente, mas são misturadas no cérebro como sinais neurais, analogamente ao que ocorre na visão binocular. outros. O efeito binaural mais importante[15] é a localização da direção de uma fonte sonora. Existem 2 processos para isto, um em baixas frequências (de 500 a 800 Hz) e outro para altas frequências

Em baixas frequências a identificação da direção da fonte sonora ocorre principalmente pela defasagem entre as ondas que chegam aos ouvidos direito e esquerdo (Figura 13). As diferenças de percurso das ondas podem variar de 0 a cerca de 25 cm, conforme a direção da fonte sonora. Por exemplo, em $\cong 680\,Hz$, o comprimento de onda é $\lambda \cong 50\,cm$, a defasagem entre as ondas

[15]Existem outros efeitos associados à audição binaural tais como "batimentos binaurais", diplacusis e outros.

é relativamente pequena e pode chegar até à ordem de grandeza de π ($\lambda/2$). Esta defasagem é percebida e interpretada pelo sistema auditivo para indicar a direção do som.

Para frequências altas ($\gtrsim 3\,kHz$), a informação contida na defasagem se torna confusa. Uma vez que λ é relativamente pequeno ($\lambda \lesssim 10\,cm$), a diferença de percurso pode ser um múltiplo inteiro de λ para diferentes direções[16]. Assim, apenas a defasagem não permite determinar a direção da fonte sonora.

Para baixas frequências ($\lambda \gtrsim 10\,cm$), o som é facilmente difratado na cabeça e coletado pelas orelhas, de forma que as intensidades que chegam nos dois ouvidos são da mesma ordem de grandeza[17].

Para frequências altas, a diferença nas intensidades sonora nos dois ouvidos se torna grande. Isto ocorre porque, para comprimento de onda apenas alguns centímetros, a difração da onda é bem menor. Assim, se a fonte está de um lado do ouvido, a intensidade no outro ouvido é bem menor.

5 Considerações gerais

A resposta do ouvido humano aos sons bastante complicada, envolvendo mescanismos bastante complexos. Neste texto foram considerados com algum detalhe somente alguns aspectos mais relevantes. Na verdade, existem vários outros mecanismos e efeitos que serão apenas resumidos a seguir. O leitor interessado pode consultar as referências citadas.

Lei de Ohm da audição

Esta lei estabelece que a qualidade de um som complexo depende apenas das amplitudes da componentes harmônicas e é independente das fases relativas dessas componentes. Em termos da Equação 15, esta lei estabelece que a qualidade do som complexo depende apenas dos coeficientes C_n das componentes harmônicas e não das defasagens ϕ_n .

Esta lei é válida como regra geral, mas pode falhar em situações particulares. (Ver Referência 5, por exemplo).

[16] Ver Questão 7.

[17] Difração num anteparo qualquer é um assunto bastante complicado. Uma boa discussão pode ser encontrada na Referência 11. Qualitativamente, pode-se dizer que a onda é bastante difratada ou totalmente difratada quando o anteparo tem dimensões comparáveis ou menor que λ . Caso contrário, o efeito da difração é pequeno.

Fundamental omitida

A frequência fundamental ν_o é o grande denominador comum num som complexo (ver Seção 3). Um som "natural" sempre tem a componente harmônica fundamental. Uma experiência interessante consiste em omitir esta componente de um som.

A componente harmônica fundamental pode ser artificialmente omitida em um som, por exemplo, usando filtro eletrônico na reprodução do som. Este "som artificial", com a fundamental omitida produz a mesma sensação auditiva que o som original. Esta observação intrigante é uma das dificuldades da teoria da localidade e indica que a percepção das componentes fundamental e harmônicas pode ser resultado de processamento neural e não simplesmente da posição da membrana basilar onde ocorre a vibração. Uma discussão mais detalhada é apresentada nas Referências 7 e 8.

Sons suprimidos

Quando a fonte sonora está em recinto fechado ou próxima a paredes, os ouvidos recebem sons refletidos, além do som direto da fonte. Por exemplo, numa sala comum, várias ondas refletidas podem chegar ao sistema auditivo com atrasos da ordem de vários milisegundos. Por um lado, tais sons não devem ser ouvidos *como sons independentes* porque seria ruído para efeito de entender a fonte original. Por outro lado, tais reflexões são muito importantes para reforçar o som original. Existem mecanismos que inibem a percepção das reflexões como sons independentes e, ao mesmo tempo, faz com que estas reflexões sirvam de importante reforço para o som original.

Deve ser observado que, na localização da direção de uma fonte sonora (Seção 4.4), o sistema auditivo pode avaliar diferenças de tempo de chegada de ondas da ordem de *fração de milissegundo*. As ondas refletidas numa sala normal chegam dezenas de milissegundos atrasadas. Isto indica que a supressão dos sons refletidos não é nenhuma limitação do sistema auditivo no aspecto de resolução temporal, mas é um mecanismo importante, e certamente bastante complicado, para melhorar a percepção do som original.

Conforme observado por Békésy (Referência 6), um dos desempenhos mais notáveis do sistema auditivo é permitir a localização de uma pessoa falando em uma sala. Uma vez que existem muitas reflexões, isto se compara a uma pessoa que, numa sala forrada de espelhos, conseguisse distinguir facilmente um objeto de suas centenas de imagens formadas pelos espelhos.

Mascaramento de sons

A existência de um som afeta a percepção de um som idêntico de menor amplitude. Conforme já observado, a "diferença apenas perceptível" (JND) em intensidade é da ordem de $1\,dB$, o que corresponde a um acréscimo de 25 % na intensidade. Isto significa que, se já existe um som presente, um som adicional idêntico com intensidade de 25 % do primeiro praticamente não é percebido. Mesmo que o som adicional tenha 50 % da intensidade do som já existente, este som será percebido muito fracamente (o aumento na intensidade total é menor que $2\,dB$). Em resumo, o som adicional, se mais fraco, fica "mascarado" por som idêntico já existente. O mascaramento de sons é, essencialmente, consequência da atenuação logarítmica do sistema auditivo.

Este efeito desempenha papel na "rejeição" de ruídos. Por exemplo, é possível ouvir uma fala normal numa festa ruidosa exceto se o ruído, além de ser semelhante ao que se ouve, também for igualmente intenso ou maior. Discussão adicional pode ser encontrada na Referência 7.

Adaptação auditiva e fadiga auditiva

A sensibilidade auditiva é reduzida após exposição prolongada a sons. No caso de exposição a sons muito intensos, a diminuição de sensibilidade pode ser bastante grande (dezenas de dB) e a recuperação pode ser bastante demorada (dezenas de horas). (Ver Referência 7, por exemplo).

Sons internos

Vários sons se originam do próprio corpo humano e chegam ao ouvido interno transmitidos através dos ossos. Em particular, grande parte da própria voz é transmitida aos ouvidos dessa maneira. Uma consequência interessante é que esta voz é muito mais rica em graves, que são perdidos na transmissão pelo ar. Quando um indivíduo ouve a gravação de sua própria voz, em geral, acha a voz mais "fraca" e fina.

Uma outra observação interessante é que o limiar de audição corresponde aproximadamente ao volume sonoro gerado pelos sons internos permanentes, tais como circulação sanguínea, batimentos cardíacos e outros. Isto é, se o sistema auditivo fosse mais sensível, a audição seria bastante perturbada por esses "ruídos internos". (Ver Referências 6 e 7, por exemplo).

Batimentos

Outros tipos de sensações de batimentos podem ser percebidos pelo sistema auditivo, além daquele simples mostrado na Figura 11. Por exemplo, pode ser percebido batimento entre o harmônico fundamental e um harmônico superior. Este batimento é chamado *batimento de qualidade* ou *batimento de 2ª ordem*. Além disso, existem os chamados *batimentos binaurais* que podem ocorrer quando os dois ouvidos são sensibilizados independentemente. (Ver Referências 4, 5 e 7, por exemplo).

Harmônicos aurais

Ação dos ouvidos externos e médio não é exatamente linear. Isto significa que uma onda harmônica pura de frequência bem definida pode chegar ao ouvido interno deformada. A deformação significa que esta onda terá harmônicos superiores que são percebidos pelo ouvido interno. Estes harmônicos não existem no som original e são criados devido à não linearidade do próprio ouvido (Ver Referências 5 e 8, por exemplo).

Combinação de tons

A partir de tons puros nas frequências ν_1 e ν_2, podem ser percebidas combinações nas frequências $\nu = (n\nu_1 \pm m\nu_2)$. Estas frequências ocorrem como componentes harmônicas da onda que se propaga no ouvido interno. Por exemplo, considerando um som fraco de 1201 Hz juntamente com tons puros de 500 e 700 Hz, verifica-se um batimento em 1 Hz. Isto corresponde ao batimento entre 1201 Hz e $\nu = (500 + 700)\, Hz$. (Ver Referências 5 e 8, por exemplo).

Referências

1. R. Halliday e D. Resnick, *Física 2,* 4ª Edição, Livros Técnicos e Científicos Editora, Rio de Janeiro (1994).

2. A. P. Cracknell, *Ultrasonics,* Wykeham Publications, London (1980).

3. N. Koshkin and M. Shirkevich, *Handbook of Elementary Physics,* MIR Publishers, Moscow (1968).

4. J. S. Rigden, *Physics and the Sound of Music*, John Wiley & Sons, New York (1977).

5. R. E. Berg and D. G. Stork, *The Physics of Sound*, Second Edition, Prentice Hall, Englewood Clifs, New Jersey (1995).

6. G. von Békésy, *The Ear*, Scientific American, Vol.197/2 (1957) p.66.

7. S. Coren, C. Porac and L. M. Ward, *Sensation and Perception*, Academic Press, New York (1979)

8. J. G. Roederer, *Introduction to Physics and Psychophysics of Music*, Springer-Verlag, New York (1973).

9. M. R. Spiegel, *Manual de Fórmulas e Tabelas Matemáticas*, McGraw-Hill do Brasil, São Paulo (1973).

10. E. G. Wever, *Theory of Hearing*, John Wiley & Sons, New York (1970).

11. E. Hecht and M. Zajac, *Optics*, 2nd Edition, Addison-Wesley (1987).

Questões

1. Calcular o deslocamento máximo de partículas do ar para uma onda sonora de $1\,kHz$ no limiar de audição. Repetir o cáculo para a máxima intensidade sonora suportável pelo ouvido humano. Massa específica do ar seco nas CNTP : $1,29\,kg/m^3$ e velocidade do som no ar nas CNTP : $331,4\,m/s$.

2. *Acoplamento acústico.* Um ultrassom deve ser transmitido de um bloco de alumínio a outro. Estimar a porcentagem da intensidade transmitida, quando existe uma camada de ar de alguns centímetros entre os blocos. Repetir o cálculo quando o espaço entre os blocos é preenchido com glicerina.

3. Num sonar para funcionar numa embarcação, a onda ultrassônica é gerada numa pastilha piezoelétrica com densidade $2,2\,g/cm^3$, sendo $3800\,m/s$ a velocidade do som na pastilha. Mostrar fazendo os cálculos relevantes, que o sonar só poderá funcionar eficientemente se for instalado imerso diretamente na água.

4. Os ossículos do ouvido médio aproximadamente duplicam a força sobre a janela oval pelo efeito de alavanca. A área da janela oval é cerca de 30 vezes menor que a área do tímpano. Indicando por I_o a intensidade da onda sonora ao chegar no tímpano:

a. Estimar a intensidade sonora I_1 no ouvido interno.

b. Estimar a intensidade sonora I_2 no ouvido interno, no caso em que não existe tímpano (nem ossículos).

c. Estimar a ampliação de um ampliador sonoro (aparelho) para compensar a ausência de tímpano e ossículos.

5. Estimar a razão das intensidades entre a componente harmônica fundamental e a outra harmônica mais intensa no som da flauta da Figura 5.

6. Estimar quantas vezes um som de $100\,Hz$ deve ser mais intenso para produzir a mesma sensação de volume sonoro que um som de $4\,kHz$ e $40\,phons$.

7. Admitir que a eficiência de um determinado tipo de buzina em converter energia elétrica em sonora seja aproximadamente constante. Determinar a frequência tal que uma buzina de $30\,dB$ seja mais eficiente. Explicar detalhadamente.

Quantas vezes mais energia gastaria uma buzina de $60\,Hz$ para produzir o mesmo volume sonoro?

8. Uma linha de pesca é firmemente presa entre 2 pontos e esticada com uma determinada tensão de forma que a frequência fundamental de vibração seja a mesma do violino da Figura 6. Uma vez excitada a corda vai emitir sons com a mesma frequência fundamental e harmônicas que o violino. Explicar detalhadamente porque os sons são muito diferentes. Qual a característica do som é diferente?

9. Considerar uma fonte sonora na frequência de $2{,}5\,kHz$ a alguns metros de um indivíduo. Fazer algumas estimativas para mostrar que a defasagem entre as ondas que chegam ao ouvido direito e esquerdo é inútil para determinar com certeza a direção da fonte. Considerar uma distância de $20\,cm$ entre as orelhas e admitir que a onda é completamente difratada no rosto e coletada pelas orelhas.