

1- Introdução

Neste artigo abordaremos as principais características do ouvido humano, uma das principais ferramentas para quem trabalha com áudio. A figura 1 apresenta as principais divisões, envolvendo o ouvido externo, o ouvido médio e o ouvido interno.

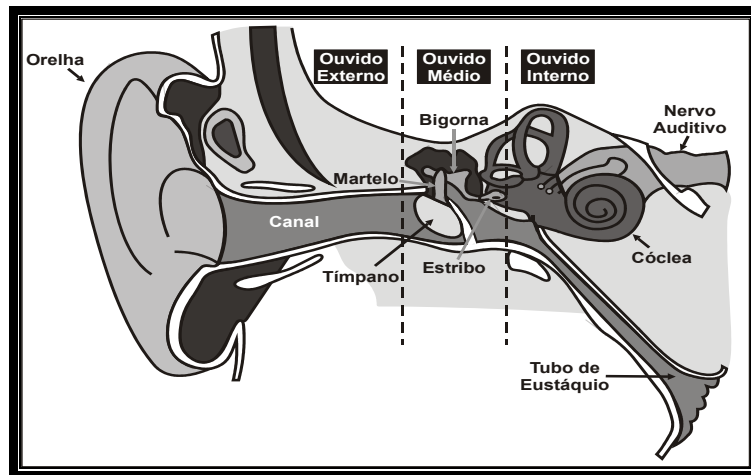


Figura 1 - Ouvido Humano

Cada parte tem uma função específica para interpretar os sons. Basicamente ocorre o seguinte: o ouvido externo serve para coletar o som e levá-lo pelo canal ao ouvido médio. No ouvido médio ocorre a transformação da energia de uma onda sonora em vibrações internas da estrutura óssea do ouvido médio, estas vibrações, por sua vez, formam uma onda de compressão no ouvido interno. O ouvido interno transforma a energia da onda de compressão dentro de um fluido em impulsos nervosos que podem ser transmitidos ao cérebro.

O tubo de Eustáquio (Trompa de Eustáquio) é um canal o qual permite que a cavidade do tímpano fique cheia de ar, provido da nasofaringe (porção mais alta da faringe). Sua função é equilibrar a pressão atmosférica no ouvido médio.

Na figura 2 podemos observar a membrana do tímpano (chamada comumente de tímpano) juntamente com o sistema ossicular, os quais conduzem o som desde a membrana timpânica, pelo ouvido médio, até a cóclea, já no ouvido interno.

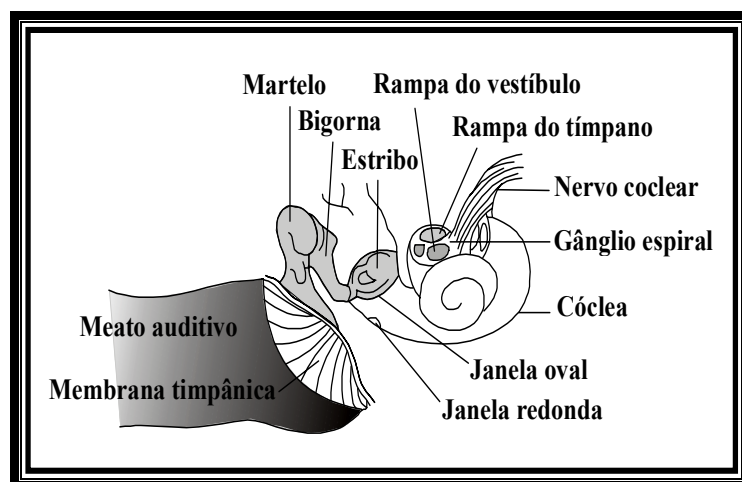


Figura 2 – Membrana Timpânica, Sistema Ossicular do Ouvido Médio e Interno

A membrana timpânica possui a forma de um cone, sendo que o cabo do martelo está fixado ao centro da membrana timpânica. Na outra extremidade, o martelo está ligado à bigorna através de diminutos

ligamentos, onde sempre que o martelo se mover, a bigorna também se moverá com ele. A outra extremidade da bigorna está ligada ao cabo do estribo, e a platina do estribo ligada à extremidade do labirinto membranoso da cóclea, na abertura da janela oval.

Os ossículos do ouvido médio são suspensos por ligamentos, que fazem o martelo e a bigorna combinados, agirem como uma alavanca única. Como a bigorna está articulada com o estribo, toda vez que a membrana e o cabo do martelo se movem para dentro o líquido coclear é empurrado, e toda vez que eles se movem para fora o líquido coclear é puxado.

A extremidade do cabo do martelo está ligada ao centro da membrana timpânica, esse ponto é constantemente empurrado pelo músculo tensor do tímpano, mantendo a membrana do tímpano sempre sob tensão, isso permite que qualquer vibração sonora, em qualquer porção da membrana seja transmitida para o martelo, o que certamente não aconteceria se a membrana não estivesse tensionada.

Quando a platina do estribo move-se para dentro, contra a janela oval, obrigatoriamente a janela redonda projeta-se para fora, pois a cóclea está limitada por todos os lados pelas paredes ósseas. Porém, a tensão elástica desenvolvida nas fibras basilares inicia uma onda líquida que viaja ao longo da membrana basilar.

2- Impedância e Sistema Ossicular

Cada amplitude de movimento na platina do estribo possui apenas três quartos da amplitude do cabo do martelo, portanto, o sistema de alavanca ossicular não aumenta a distância da movimentação do estribo, mas sim diminui a distância da movimentação, o que aumenta é a força de movimentação por cerca de 1,3 vezes. Outra diferença é que a área da membrana do tímpano tem cerca de 55 milímetros quadrados, enquanto a área do estribo tem cerca de 3,2 milímetros quadrados em média, totalizando uma diferença de aproximadamente 17 vezes. Essa diferença multiplicada pela relação de 1,3 do sistema de alavanca faz com que a força exercida sobre o líquido da cóclea seja equivalente a uma pressão 22 vezes maior do que a pressão exercida por uma onda sonora na membrana timpânica.

Esse fato se dá em função do líquido possuir uma inércia¹⁰ muito maior que o ar, necessitando de maior pressão para causar a vibração no líquido. O sistema ossicular e a membrana do tímpano proporcionam o ajuste de impedâncias entre as ondas sonoras no ar e as vibrações do som no líquido da cóclea. O curioso é que o ajuste das impedâncias é 50 a 75% perfeito para frequências compreendidas entre 300Hz e 3000Hz, permitindo maior utilização da energia das ondas sonoras incidentes dentro desta faixa.

Quando não existem mais o sistema ossicular e a membrana timpânica, as ondas sonoras ainda chegam até a cóclea pela janela oval (observar figura 2) através do ar, deslocando-se diretamente pelo ouvido médio, com isso, ocorre uma diminuição de cerca de 15 a 20 decibéis na sensibilidade de audição, por falta da transmissão ossicular, ou seja, 15 a 20 decibéis equivalem à diminuição do nível médio da voz para um nível pouco perceptível.

3- O Princípio de “Localização” – Frequência do Som

As figuras 3 e 4 exemplificam como viajam as ondas ao longo da membrana basilar (dentro da cóclea) para sons de alta, média e baixa frequência.

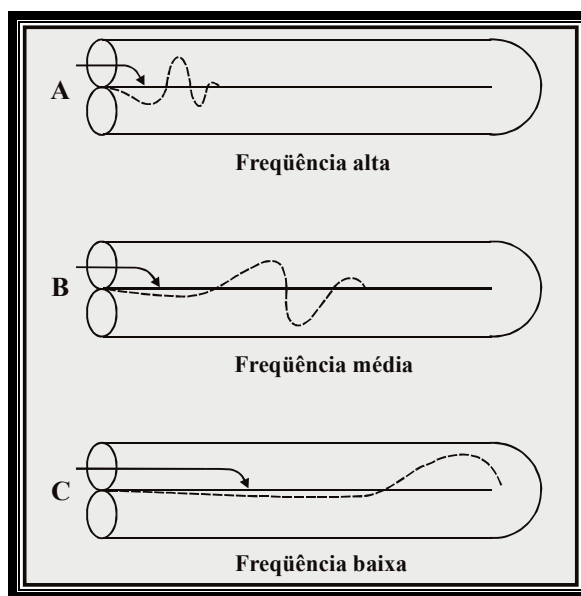


Figura 3 – Ondas Viajantes ao Longo da Membrana Basilar

¹⁰ Tendência de um objeto parado permanecer parado ou de um objeto em movimento permanecer em movimento com a mesma velocidade e direção.

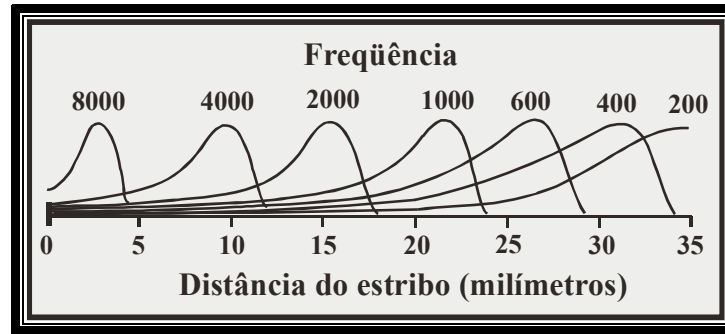


Figura 4 – Amplitude para Sons de Frequências entre 200 e 8000Hz

Pela figura 4 percebemos que sons de alta frequência atingem regiões próximas da base da cóclea, frequências intermediárias atingem distâncias intermediárias e frequências baixas causam ativação máxima da membrana basilar próximo ao fim da cóclea. Estas diferentes distâncias são o que denominamos “**princípio da localização**”, pois é através dos diferentes locais que são estimuladas dentro da via coclear que detectamos quais são as frequências sonoras que estamos recebendo. O método principal utilizado pelo sistema nervoso para identificar diferentes frequências sonoras é determinar as posições ao longo da membrana basilar que são mais estimuladas.

Na figura 4 também é possível observar que todas as frequências abaixo de 200 ciclos/segundo (Hz) atingem a extremidade distal ou final da membrana basilar (membrana dentro da cóclea), com isso fica difícil entender como se consegue distinguir frequências sonoras baixas, na faixa de 20 a 200Hz. Pois bem, é postulado que sons com frequências baixas podem causar “salvas de impulsos” sincronizados nas mesmas frequências. Essas salvas são transmitidas aos núcleos cocleares do encéfalo e estes são capazes de distinguir as diferentes frequências recebidas. Isso é reforçado pelo motivo de que quando é destruída a membrana basilar da cóclea, onde é detectada a maioria das frequências, não é eliminada a discriminação dos sons de frequência mais baixa. Esta outra forma de detectar frequências mais baixas é denominada de “**princípio de frequência ou de rajada**”.

4- Determinação da Intensidade dos Sons

Pelo menos três maneiras são utilizadas para percepção de intensidade. A primeira, é que a medida que o som fica mais alto, aumenta também as vibrações da membrana basilar (dentro da cóclea) e das células ciliadas, com isso ocorre um aumento do ritmo de excitação das terminações nervosas. A segunda, é que a medida que a amplitude da vibração aumenta, mais células ciliadas são estimuladas, causando uma soma espacial dos impulsos, ou seja, transmissão por muitas fibras nervosas e não por apenas algumas. A terceira, é que as células ciliadas externas não recebem estimulação significativa enquanto a amplitude da vibração da membrana basilar não atinja alta intensidade, sendo que essa estimulação pode informar ao sistema nervoso que o som está alto.

5- Variações da Intensidade – Lei da Potência

A variação da intensidade dos estímulos sensoriais ocorre aproximadamente em proporção de uma função da potência da intensidade real. Para o som, a sensação interpretada é alterada quase proporcionalmente à raiz cúbica da intensidade real do som. Essa discriminação de diferenças quanto à intensidade é expressa pelo ouvido desde um sussurro até o som mais alto possível, e isso, representando um aumento de cerca de um trilhão de vezes (120dB de potência) em relação a energia sonora, ou um aumento de um milhão de vezes (120dB de amplitude) a movimentação da membrana basilar. Mesmo assim, o ouvido humano interpreta essa enorme diferença de níveis do som como uma alteração de aproximadamente 10.000 vezes, com isso, a escala de intensidade torna-se bastante comprimida pelos mecanismos de percepção do sistema auditivo. Mas é graças a essa compressão que interpretamos as diferenças de intensidade ao longo de uma faixa extremamente ampla, e, com certeza muito mais ampla do que seríamos capazes de interpretar se não fosse a compressão da escala de intensidade.

Agora fica mais fácil entender o uso do decibel para expressar essas variações. Vejamos: primeiramente é por causa das extremas variações de intensidades sonoras que o ouvido consegue detectar e discriminar, dessa forma a utilização do decibel expressando as intensidades em termos do logaritmo das suas intensidades reais é fundamental, onde um decibel representa um aumento real da energia sonora em 1,26 vezes. Segunda razão é que na faixa usual de intensidade sonora para comunicação, os ouvidos mal conseguem distinguir uma alteração de aproximadamente um decibel na intensidade sonora.

6- Limiar da Audição do Som com Base em Diferentes Frequências

A figura 5 mostra o comportamento da audição do som para diferentes frequências. Nesta figura também podemos observar os diferentes limiares de pressão nos quais os sons com frequências diferentes mal podem ser ouvidos pelo ouvido.

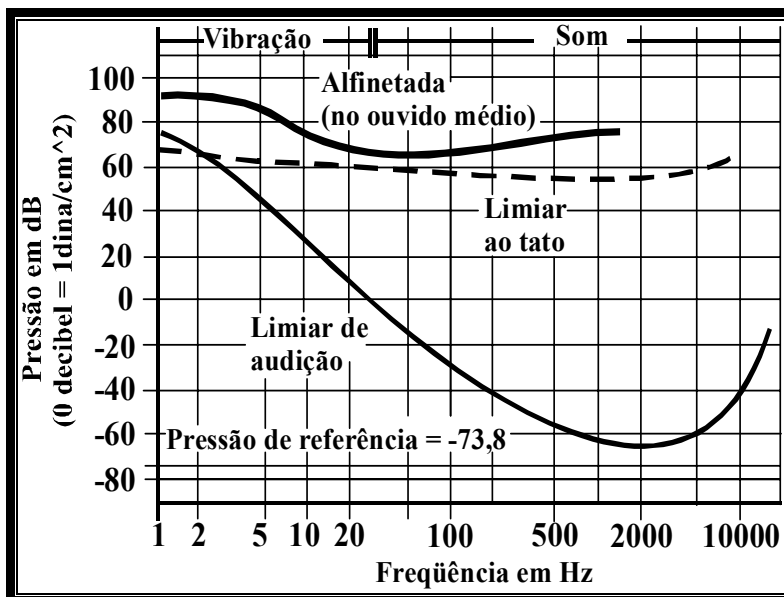


Figura 5 – Limiar da Audição do Som para Diferentes Frequências

Observe que para 2000 ciclos/s (Hz) o som pode ser ouvido até quando sua intensidade chega a aproximadamente -70 decibéis, ou seja, 70 decibéis abaixo do nível de pressão sonora de 0 dB = 1 dina/cm² (1 dina/cm² [unidade do sistema CGS, centímetro-grama-segundo] é igual a 10⁻¹Pa = 1uB, pois lembre-se que 1Pa é igual a 10uB). Para a frequência de 100 ciclos/s observamos que o nível de pressão está a aproximadamente -30 decibéis do nível de 0dB, o que nos mostra que da frequência de 2kHz para a frequência de 100Hz há uma diferença de nível de audição de aproximadamente 40 decibéis, ou seja, em 2Hz a sensibilidade tem uma relação de audição 40dB maior. Quantas vezes a mais ou a menos intensidade significam 40 decibéis?

$$\text{proporção} = \sqrt[10]{10^{40}} \Rightarrow (10)_{10}^{40} = 10.000\text{vezes}$$

Obs: fator de multiplicação é 10 porque se trata de Intensidade.

Podemos perceber que de 2kHz para 100Hz nosso ouvido tem uma variação de audição de aproximadamente 10.000 vezes, e também entendermos porque a região dos médios é escutada com tanta facilidade, pois nessa região podemos ouvir os sons com um nível de intensidade muito mais baixo que em baixas e altas frequências.

7- Faixa de Frequências Audíveis pelo Ouvido Humano

Afirma-se que uma pessoa jovem consegue ouvir uma faixa de frequência entre 20Hz e 20kHz, isso antes de ocorrer o envelhecimento dos ouvidos. Pela figura 5 pode-se observar que essa faixa de frequência sonora é, em grande parte, dependente da intensidade do som. Se o nível estiver 60dB abaixo de 1dina/cm²(0dB) a faixa se limita entre 500Hz e 5kHz, somente para sons bem intensos pode ser alcançada a faixa de 20Hz a 20kHz. Na velhice essa faixa cai para aproximadamente 50Hz a 8kHz ou até menor dependendo do caso.

8- Comportamento do Ouvido Humano

O ouvido humano consegue resistir a pressões sonoras de amplitude maior que 100 Pa, podendo ainda detectar pressões da ordem de 0,00001Pa (10uPa). Pressões sonoras tão pequenas, mas na faixa de 1kHz a 5kHz onde o ouvido possui sua maior sensibilidade, podem ser detectadas mesmo que estas produzam um deslocamento no tímpano na ordem de 10⁻¹²metros (10 picômetros). Para se ter uma idéia desta minúscula distância, é aproximadamente um décimo do diâmetro de uma molécula de hidrogênio, ou seja, é um deslocamento muito pequeno.

Percebe-se então que o ouvido é um microfone extremamente sensível, e não somente um microfone, mas um analisador de freqüências juntamente com o cérebro capaz de discriminar perfeitamente as tonalidades. A característica subjetiva conhecida como altura, é uma função direta da intensidade e da freqüência do som. A figura 6 nos mostra as diferentes curvas de audição apresentadas por Robinson e Dadson conforme a variação da intensidade sonora.

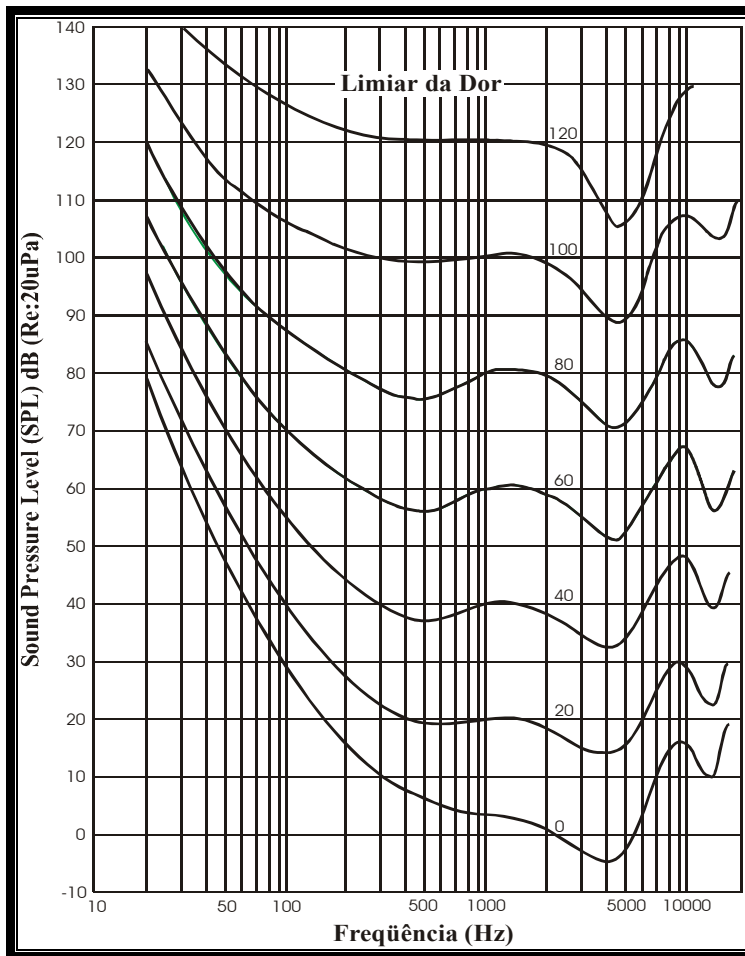


Figura 6 – Curvas de Audibilidade de Robinson e Dadson

Podemos observar que quanto menor a intensidade, maior será a diferença de audição entre freqüências baixas (graves) e freqüências altas (agudos). Por causa desta variação enorme de níveis de audição do ouvido humano criaram-se as redes de ponderação, as quais tem o objetivo de fazer corresponder à leitura dos instrumentos o mais próximo possível ao nível de altura percebido. Estas curvas são aproximadamente o inverso das curvas de audição para diferentes níveis de intensidade sonora mostrados na figura 6.

A figura 7 ilustra as redes de ponderação A, B, C e D.

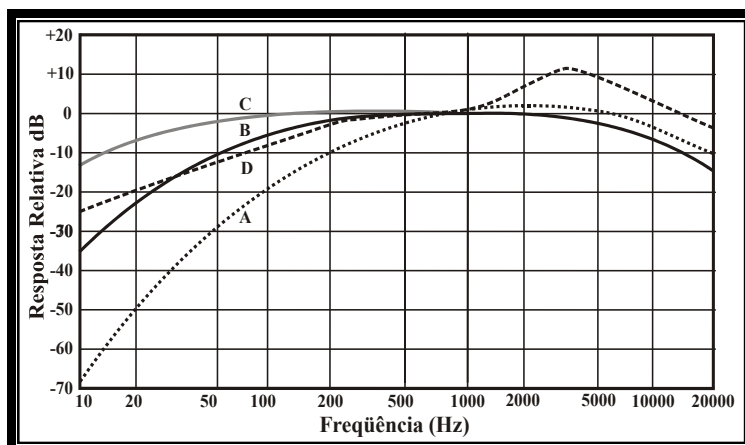


Figura 7 – Resposta de Freqüência para as Redes de Ponderação

- **Ponderação A:** simula a resposta de frequência do ouvido para baixos níveis, de 40 a 50 decibéis.
- **Ponderação B:** simula a resposta de frequência do ouvido para um nível de conversação normal, aproximadamente 70 decibéis (pouco utilizada).
- **Ponderação C:** simula a resposta de frequência do ouvido para altos níveis, maiores de 90 decibéis.
- **Ponderação D:** usada para avaliar o aumento de perturbação pelo som de alta frequência presente no ruído produzido por certas naves aéreas.

Obs: Atualmente a rede de ponderação “A” está sendo bastante utilizada para avaliar sons independentemente do seu nível, e não somente para sons de baixo nível sonoro.

9- Referências bibliográficas

- [1] GAYTON, Arthur C., M. D.; HALL, John E., PH. D. **Tratado de Fisiologia Médica**. 10ª ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Koogan S.A., 2002.
- [2] BRUNNER&SUDDARTH. **Tratado de Enfermagem Médico Cirúrgica**. 9ª ed. Vol II Rio de Janeiro: Editora Guanabara Koogan S.A., 2002.
- [3] PETERSEN, Dr. Carlos Allan Caballero. **Apostila de Eletro-Acústica e Acústica de Locais**. Departamento de Engenharia Elétrica. Universidade de Passo Fundo. Rio Grande do Sul, 1998.
- [4] BERTULANI, C. A. **Curso de Física 2 Interativo**. Disponível em: <<http://www.if.ufrj.br/teaching/fis2>>. Acesso em 20 de janeiro de 2004.
- [5] GARDINI, Giacomo; LIMA, Norberto de Paula. **Dicionário de Eletrônica**. São Paulo: Editora Hemus, 1982.