

UM RECURSO DIDÁTICO PARA ENSINO DE FÍSICA, BIOLOGIA E MÚSICA

Laura Rita Rui^a [laurarui@cpovo.net]

Maria Helena Steffani^b [steffani@if.ufrgs.br]

^{a,b}*Instituto de Física – UFRGS – Caixa Postal 15051.*

Campus do Vale, 91501-970, Porto Alegre, RS – Brasil.

^b*Planetário José Baptista Pereira – UFRGS*

Avenida Ipiranga 2000, CEP 90160-091 – Porto Alegre, RS – Brasil.

Resumo

O SOM é talvez um dos temas mais fascinantes tanto por sua diversidade quanto por sua complexidade. A produção, a propagação e a percepção do som envolvem conceitos físicos, biológicos, artísticos e psíquicos que perpassam todas as áreas do conhecimento humano. Com a perspectiva de contribuir para o ensino de Física, tanto em nível fundamental quanto médio, e pensando na cooperação profissional entre professores de diferentes áreas e séries de ensino, apresentamos um recurso didático que pode ser explorado em Ciências, Física, Biologia e Música. Trata-se de um painel sobre audição humana, focalizando os fenômenos físicos que ocorrem ao longo do ouvido externo, ouvido médio e ouvido interno no processo da audição.

Palavras-chave: som, audição humana, interdisciplinaridade.

Justificativa

Os PCN's – Parâmetros Curriculares Nacionais, que são a base comum para a elaboração e reelaboração dos currículos nas escolas do país, destacam a necessidade de um currículo interdisciplinar, já no ensino fundamental:

Em relação aos conteúdos conceituais, particularmente de quinta a oitava séries, persiste uma tendência que os aborda de modo estanque nas disciplinas científicas, tais como se consagraram há mais de um século, e de forma caricatural. Apresenta-se separadamente Geologia, dentro de água, ar e solo; Zoologia e Botânica, como sendo classificação dos seres vivos; Anatomia e Fisiologia humana, como sendo todo o corpo humano; **Física, como fórmulas**, e Química como o modelo atômico-molecular e a tabela periódica. As interações entre os fenômenos, e destes com diferentes aspectos da cultura, no momento atual ou no passado, estudadas recentemente com maior ênfase nas Ciências Naturais, estão ausentes... (PCN's, v. 4 – Ciências Naturais 5^a a 8^a séries)

Neste trabalho apresentamos um recurso didático que pode ser explorado em Ciências, Física, Biologia e Música com a perspectiva de contribuir para o ensino tanto em nível fundamental quanto médio: um painel sobre audição humana, focalizando os fenômenos físicos que ocorrem ao longo do aparelho auditivo (ouvido externo, ouvido médio e ouvido interno) no processo da audição.

O estudo da audição humana revelou-se potencialmente adequado para uma proposta interdisciplinar, tendo como tema central o som. No contexto da Física, o estudo da produção, propagação e percepção do som introduz uma gama enorme de conceitos físicos: vibração, frequência, período, velocidade, comprimento de onda, energia, pressão, ressonância, etc. Já no contexto artístico, conceitos como ritmo, harmonia, tom, melodia e outros parecem em nada se relacionarem com os conceitos físicos mencionados. Por sua vez, o estudo do ouvido humano nas aulas de biologia quase sempre tem um caráter mais informativo, restringindo-se, via de regra, à identificação das partes que compõe o ouvido com as descrições de suas funções básicas.

Freqüentemente o professor de Física, quando questionado sobre a utilidade ou aplicação do tema tratado em sala de aula, recorre ao enfoque matemático ou à aplicação tecnológica para o assunto. Mas porque não aplicar as leis da Física para explicar o “funcionamento” do próprio corpo ou dos seres vivos em geral?

Na realidade, a Física explica boa parte do “funcionamento” do nosso corpo através da Biofísica, que *é a ciência que tem por objeto a investigação dos fenômenos fundamentais de todo o organismo vivo e sua explicação por métodos físicos, por exemplo, a atividade das células sensitivas, musculares e nervosas* (Dicionários Técnicos Melhoramentos – Física, 1980).

Com esse trabalho, acreditamos disponibilizar um recurso didático interdisciplinar inédito e importante para professores de Ciências, Física e Biologia, de ensino fundamental e médio, e potencialmente significativo para seus alunos.

Painel sobre audição humana

Apresentamos a seguir um texto de estudo sobre o sistema auditivo, que complementa as informações contidas no painel. Este texto ainda está longe de dar conta de toda a complexidade do assunto, mas certamente contém bem mais informações do que as encontradas nos livros didáticos de Física e Biologia para o ensino básico.

O ouvido humano é dividido em três partes – os ouvidos externo, médio e interno, sendo que ocorrem processos mecânicos no ouvido externo e médio, e processos mecânicos e elétricos no ouvido interno. Isso explica também porque o ouvido interno é o mais complexo de todos, ligado diretamente ao encéfalo pelo nervo auditivo. Não seria incorreto afirmarmos que o encéfalo faz parte do sistema auditivo, já que é ele que decodifica os impulsos elétricos gerados no ouvido interno. Sem o encéfalo os sons não teriam sentido para nós.

Sentido, sensação. O som é muito mais do que sugerem as definições da maioria dos livros didáticos: o som é uma onda mecânica, que se propaga em um meio material (sólido, líquido ou gasoso) cuja frequência audível ao homem está compreendida entre 20 hertz e 20.000 hertz...

Pode ser fácil apresentar este tema aos alunos de forma a levar em conta os seus conhecimentos prévios, tornando-o mais significativo e, até mesmo, valorizando suas vivências musicais. Os conceitos físicos podem ser compartilhados com professores de outras áreas, enriquecendo-os e fugindo dos conceitos já caricaturados e não significativos. Por exemplo, em seu livro *O som e o sentido – uma outra história das músicas*, J. M. Wisnik, pianista clássico e compositor, apresenta sua definição de som:

Sabemos que som é onda, que os corpos vibram, que essa vibração se transmite para a atmosfera sob a forma de uma propagação ondulatória, que o nosso ouvido é capaz de captá-la e que o cérebro a interpreta, dando-lhe configurações e sentidos (WISNIK, 1999, p. 15), introduzindo não somente conceitos físicos como vibração e propagação de ondas, mas também o processo de captação e interpretação dos sons.

Para haver som, é necessário fazer vibrar um meio. Muitas vezes podemos sentir ou até mesmo ver essas vibrações: coloque os dedos sobre a garganta e sinta as suas cordas vocais vibrarem enquanto você fala ou perceba a vibração de um diapásão que, depois de perturbado, é mergulhado em água.

A vibração se propaga pelo ar através das partículas que o formam, gerando zonas de maior e menor pressão, respectivamente zonas de compressão e rarefação, num movimento de vaivém, pois o meio é elástico. Logo, as partículas do meio não se transmitem junto com o som pelo ambiente, o que se propaga é a energia de vibração que deu origem ao som.

Mas atenção: todo som gera uma vibração no meio pelo qual se propaga, mas nem toda vibração produz som audível para nós. Ou seja, existem sons que não podemos ouvir.

Por experiência diária, sabemos que quando a intensidade do som (popularmente conhecida como volume) é baixa, ou seja, o som é fraco, temos dificuldade de ouvir. Essa dificuldade de ouvir sons fracos (ou de volume baixo) depende de pessoa para pessoa, aumentando muito na velhice.

Mas também os nossos ouvidos não têm capacidade de perceber sons com freqüências muito baixas - abaixo de 20 Hz (os infra-sons), ou freqüências muito altas - acima de 20.000 Hz (os ultra-sons). Por isso dizemos que a faixa de freqüência de sons audíveis para o homem está entre 20 e 20.000 Hz. Mas isso também pode variar de pessoa para pessoa, pois o limite superior da audição humana declina com o envelhecimento. Esse processo é chamado presbiacusia (Jourdain, 1997, p. 38).

O ouvido externo é formado pelo pavilhão auditivo – ou orelha, e pelo canal auditivo.

O pavilhão auditivo é constituído de cartilagem revestida de pele. Seu formato – cheio de curvas, sulcos e elevações – age como um funil, ajudando as ondas sonoras a se concentrarem no canal auditivo mediante reflexões.

O canal auditivo – que se estende por aproximadamente 2,5 cm, tem pêlos e cera que agem como filtros, protegendo o ouvido da entrada de sujeira do exterior. É através do canal auditivo que as ondas sonoras são concentradas por reflexões e levadas até o tímpano, já no ouvido médio.

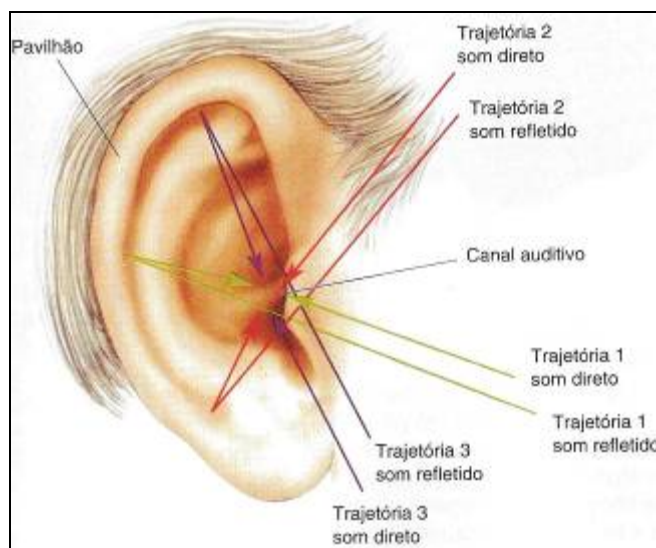


Figura 1 – BEAR et al.

O som pode entrar pelo canal auditivo de maneira direta, ou ser refletido pelo pavilhão auditivo, cujo formato é essencial para que ocorram essas reflexões.

As diferenças entre o tempo do som que chega diretamente e o som refletido pelo pavilhão auditivo é percebido sutilmente e muda conforme a posição ou o movimento da fonte de som. Isso faz com que localizemos as fontes de som.

Para entendermos melhor a importância do pavilhão auditivo na captura dos sons verticais, basta cobri-lo impedindo as reflexões.

O pavilhão auditivo pode variar muito nas diversas classes de animais, dependendo dos hábitos e necessidades de sobrevivência. Na verdade, apenas os mamíferos possuem pavilhão auditivo e, em algumas espécies, ele é realmente fundamental.

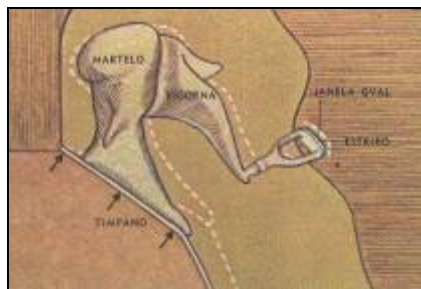


Figura 2 – STEVENS, S. S. & WARSHOFKY, F.

O fêneco, de hábitos noturnos, tem os pavilhões auditivos gigantes devido a duas razões importantíssimas para sua sobrevivência: captar os sons menos intensos de suas presas na escuridão do deserto e ajudar na dissipação do calor corporal – função vital para animais que vivem em climas muito quentes.

Sem dúvida, os morcegos têm o mais eficiente sistema para captar sons de todos os animais. Apesar de existirem muitas famílias de morcegos, todos dependem da localização de sons para a sobrevivência. Os morcegos orientam-se e localizam a caça funcionando como o sonar de um navio: eles emitem ultra-sons que são refletidos pelos objetos, ou seja, eles se localizam por ecos.

Entretanto, as aves não possuem pavilhão auditivo, pois sua sobrevivência depende do vôo: sem ele, as aves tornam-se mais aerodinâmicas. O funcionamento do ouvido médio e interno das aves é igual ao de um mamífero, sendo que a cóclea das aves é apenas encurvada e não enrolada em espiral. Mesmo sem o pavilhão auditivo as aves ouvem muito bem.



A participação do ouvido médio começa quando as ondas sonoras atingem o tímpano fazendo-o vibrar e termina quando o estribo pressiona a janela oval, já no ouvido interno.

Figura 3 – STEVENS, S. S. & WARSHOFSKY.

O tímpano assemelha-se a um tambor: é uma membrana elástica, com cerca de 0,1mm de espessura e entre 9 e 10mm de diâmetro, e fortemente esticada. Quando o som atinge o tímpano, a energia associada à perturbação do ar (meio em que o som se propagava) é transmitida à membrana timpânica, fazendo-a vibrar de acordo com a frequência e amplitude do som que a atingiu. Se o som for agudo, o tímpano vibra mais rapidamente do que se o som fosse grave; se o som for forte (alta amplitude), o tímpano vibra com movimentos maiores do que se o som fosse fraco (baixa amplitude). Na verdade, o som empurra e puxa o tímpano, num movimento contínuo, já que as ondas sonoras são formadas por regiões de compressão e rarefação das partículas do ar. Essas perturbações do tímpano são transmitidas, via ossículos, à janela oval num movimento de pistão.

Mesmo que os sons que pressionam o tímpano sejam fortes, o tímpano sofre apenas movimentos microscópicos. Esses movimentos não são suficientes para estimular os órgãos de Corti – parte mais importante em todo o processo da audição, já no caracol do ouvido interno, que é preenchido completamente por líquidos. Para que as vibrações das ondas sonoras atinjam eficientemente o ouvido interno, estimulando os órgãos de Corti, o som é amplificado ainda no ouvido médio pelos ossículos: martelo, bigorna e estribo.

Mas por que o nosso ouvido não é feito de modo que o som pressione diretamente a janela oval?

O fato é que o ouvido interno está preenchido completamente por líquidos (a perilinfa e a endolinfa) e não por ar. É necessária uma pressão maior para fazer vibrar um líquido do que para fazer vibrar o ar e são os ossículos os responsáveis por tal amplificação.



Figura 4 – STEVENS, S. S. & WARSHOFKY, F.

A pressão - força dividida pela área - na janela oval pode tornar-se maior do que a pressão no tímpano se:

(1) a força sobre a janela oval for maior do que a força no tímpano, ou

(2) se a área da janela oval for menor que a área do tímpano.

Mas acontecem as duas coisas: os ossículos atuam como alavancas e aumentam a força na janela oval e a área da janela oval é muito menor que a área do tímpano.

(Observe, na figura ao lado, as diferenças entre as áreas demarcadas em vermelho).

Considerando que o estribo tem aproximadamente o diâmetro de um grão de arroz, 2 mm, e lembrando que o tímpano tem cerca de 10mm de diâmetro, podemos estimar suas áreas:

$$\text{Área de um círculo: } 2 \times \pi \times \left(\frac{\text{diâmetro}}{2}\right)^2$$

$$\text{Área do tímpano: } 2 \times 3.14 \times \left(\frac{10}{2}\right)^2 = 2 \times 3.14 \times 5^2 = 2 \times 3.14 \times 25 = 157 \text{ mm}^2$$

$$\text{Área do estribo: } 2 \times 3.14 \times \left(\frac{2}{2}\right)^2 = 2 \times 3.14 \times 1^2 = 2 \times 3.14 \times 1 = 6.28 \text{ mm}^2$$

Concluímos que a área do estribo é, aproximadamente, 25 vezes menor do que a área do tímpano ($\frac{157}{6.28} = 25$), por isso a pressão que o estribo faz sobre a janela oval é aproximadamente 25 vezes maior que a pressão que o tímpano faz sobre o martelo! É por isso que dizemos que os ossículos amplificam os sons.

Mas o que acontece com os ruídos que já chegam ao tímpano muito intensos e não podem ser ainda mais amplificados, sob pena de danificar o sistema auditivo?

Dois músculos, que estão juntos ao crânio, enrijecem e diminuem o movimento dos ossículos à medida que a intensidade do som aumenta, observe-os na figura 4. Um deles, o músculo tensor do tímpano, liga o osso da cavidade do ouvido médio ao martelo e retém o tímpano, reduzindo sua capacidade de vibração. O outro, o músculo estapédio, afasta o estribo da janela oval, que é o ponto de contato com o ouvido interno. Quando esses músculos se contraem, acionados por um som muito forte como em festas ou shows, ocorre o chamado reflexo de atenuação. Após um tempo de exposição, esse reflexo fica “saturado” e quando saímos para longe do som, ouvimos um zumbido constante (tinido). Mas o reflexo de atenuação ocorre entre 50 e 100 milissegundos após o som ter alcançado o ouvido; esse retardo de tempo possibilita que haja prejuízo ao ouvido interno, principalmente se o som for repentino e muito intenso, como por exemplo, uma explosão. *A atenuação do som é muito maior em baixas do que em altas frequências* (Bear et al, 2002, p. 356).

A intensidade (I) é uma propriedade física do som e está associada à energia de vibração da fonte sonora. A onda sonora transporta essa energia, distribuindo-a em todas as direções do espaço. Quanto maior for a energia por unidade de tempo (potência) que a onda sonora transporta até nosso ouvido, maior será a intensidade do som. Matematicamente $I = P/\Delta S$, tendo como unidade o watt por metro quadrado (W/m^2).

A menor intensidade de som que o ouvido humano pode ouvir é da ordem de 10^{-12} W/m^2 . Já a maior intensidade suportável situa-se em torno 1 W/m^2 .

Usa-se uma unidade especial para expressar essa grande variação de intensidades percebidas pelo ouvido humano: o bel (B). O significado dessa unidade é o seguinte: dois sons

diferem de 1B quando a intensidade de um deles é 10 vezes maior (ou menor) que a do outro, diferem de 2B quando essa intensidade é 100 vezes maior (ou menor) que a do outro, de 3B quando ela é 1 000 vezes maior (ou menor) que a do outro, e assim por diante. Na prática, usa-se o decibel (dB), que corresponde a 1/10 do bel (UFRGS – Concurso Vestibular 2002, questão 23).

No gráfico abaixo são apresentados, para o intervalo de freqüências de 20 a 20 000 hertz, os limites da audição humana: sons com intensidade em torno de 1dB mal podem ser ouvidos, uma conversação normal gira em torno de 60 a 70dB, acima de 100dB causam desconforto, e intensidades em torno de 120dB causam dor.

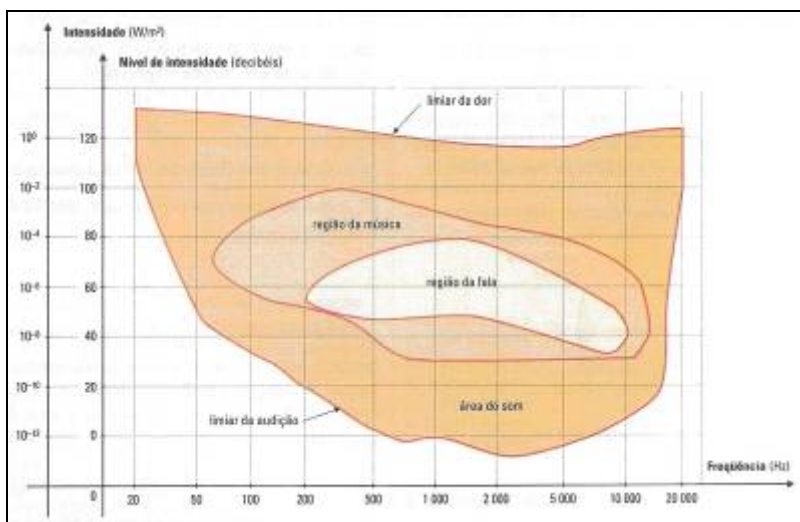


Figura 5 – GASPAR.

O gráfico mostra que a sensibilidade auditiva não é a mesma para todas as freqüências: quanto mais grave for o som, maior a intensidade necessária para percebê-lo. Por outro lado, a sensibilidade aumenta muito para os sons com freqüências em torno de 1 800 hertz. Mesmo sons com nível intensidade cerca de 0dB podem ser percebidos nessa faixa de freqüências.

Devemos levar em conta que o gráfico apresenta os valores relativos e não absolutos da intensidade, nível de intensidade e freqüências de sensibilidade da audição humana. Conforme citado anteriormente, a sensibilidade varia de pessoa para pessoa, e um dos fatores pode ser a idade: quanto maior a idade menor a sensibilidade para ouvir os sons de maior freqüência, e o nível de intensidade sonora deve aumentar para que um som seja percebido pelo ouvido.

Em média, a freqüência máxima que uma pessoa de 45 anos pode ouvir é da ordem de 12 kHz. O nível mínimo de intensidade sonora de uma nota, por exemplo de 4000 Hz, deve ser, em média cerca de 10dB mais intenso para uma pessoa de 45 anos do que para uma de 20 (Okuno, 1982, p. 235).

A contínua exposição a sons muito intensos por um determinado tempo – acima de 80dB, pode causar danos irreversíveis aos sensíveis órgãos de Corti, causando doenças graves tais como neurose, insônia e, conseqüentemente, queda de produtividade física e mental.

A Legislação Brasileira, na Norma Regulamentadora n. 15 do Ministério do Trabalho Portaria 3214/78, estabelece os limites de tolerância para ruídos contínuos ou intermitentes (com equipamento de proteção): 85dB para uma exposição máxima de 8 horas por dia e 115dB para uma exposição máxima de 7 minutos por dia. A legislação também prevê que uma exposição contínua a ruídos superiores a 85 dB pode causar perdas permanentes de audição e, apenas 5dB acima disso (90dB), exige que o tempo de exposição seja reduzido à metade (4 horas). Esses limites nos fazem perceber que os danos à audição não dependem somente da intensidade do ruído, mas também do tempo de exposição.

Outrossim, quando ocorrem grandes variações na pressão atmosférica, a tuba de Eustáquio (Fig. 6) que liga o ouvido médio à faringe através de uma válvula, que normalmente está fechada, se abre permitindo entrada ou saída de ar.

Durante a descida dos aviões, ou viagens com subida ou descida de serras, muitos passageiros sentem desconforto no ouvido justamente pela mudança na pressão atmosférica: quando nos dirigimos a regiões de maior altitude, a pressão atmosférica diminui. Durante viagens com mudança de altitude, é possível que a pressão atmosférica exterior fique diferente da pressão interna no ouvido médio, causando desconforto. Uma leve tossida pode igualar essa diferença de pressão, fazendo com que uma quantidade de ar entre ou saia do ouvido médio através da tuba de Eustáquio, aumentando ou diminuindo a pressão neste e igualando-a assim à pressão atmosférica.

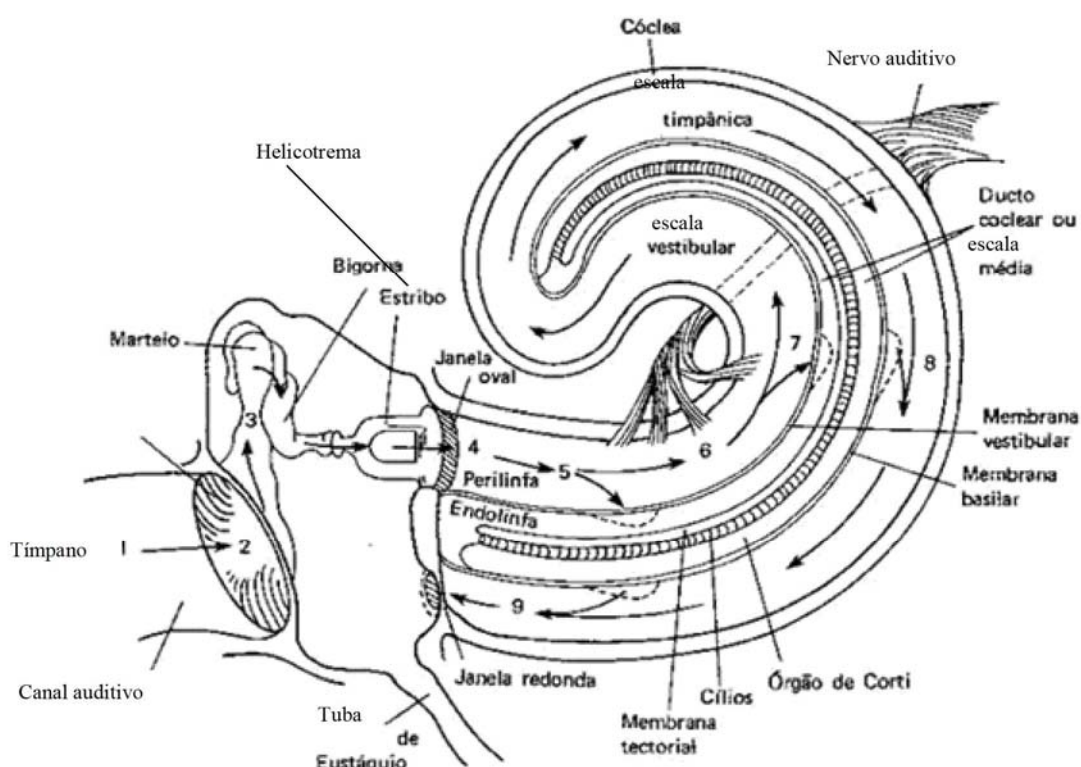


Figura 6 – Adaptada de OKUNO et al.

O ouvido interno é formado pela cóclea – que é parte do sistema auditivo responsável pela transformação do som em sinal neural, e pelo labirinto – que nada tem a ver com a audição, apenas com a manutenção do equilíbrio do corpo.

A cóclea é aproximadamente do tamanho de uma ervilha e consiste de um canal ósseo espiralado, dividido (incompletamente) por finas lâminas ósseas em três canais separados, chamados de escala vestibular, escala média e escala timpânica, totalmente preenchida por líquidos.

As escalas vestibular e timpânica se comportam como um único sistema hidrodinâmico pelo fato de estarem conectadas no ápice da cóclea por um orifício chamado helicotrema (Figuras 6 e 8). A transmissão integral da pressão da perilinf, que é um líquido incompressível, através dessas escalas é explicada pelo Princípio de Pascal.

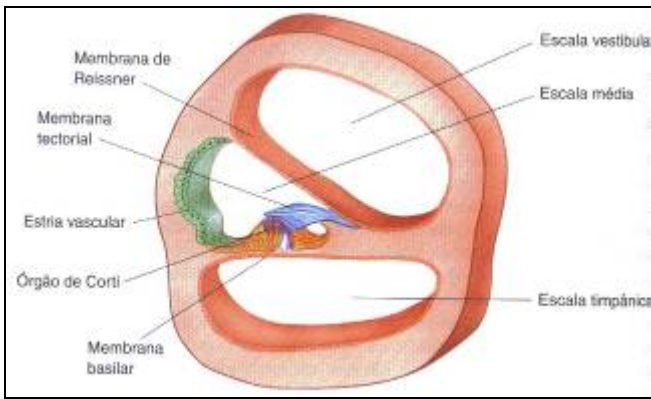


Figura 7 – BEAR et al.

Ao lado, a cóclea em corte transversal mostrando a divisão coclear em escalas vestibular e timpânica, e no centro a escala média.

A perilinfa percorre as escalas vestibular e timpânica, em sentidos contrários, transmitindo os movimentos à membrana de Reissner e à membrana basilar - que são as “paredes” da escala média, e conseqüentemente à endolinfa.

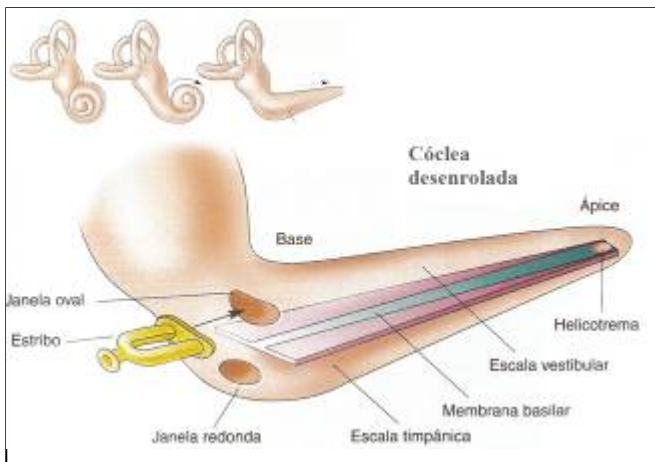


Figura 8 – BEAR et al.

Ao lado, a representação da cóclea desenrolada para visualizarmos a localização e diferença morfológica da membrana basilar dentro da cóclea, ao longo dos seus aproximados 34mm.

A membrana basilar é particularmente importante, por dois motivos: é sobre ela que está o órgão sensorial da audição – o órgão de Corti, e é nessa membrana que os sons agudos e graves são distinguidos.

As diferenças de pressão resultantes, através da divisão coclear, entre as duas escalas flexibilizam (deslocam) a membrana basilar para cima e para baixo, colocando-a em movimento como uma bandeira tremulante (Roederer, 1998, p. 47).

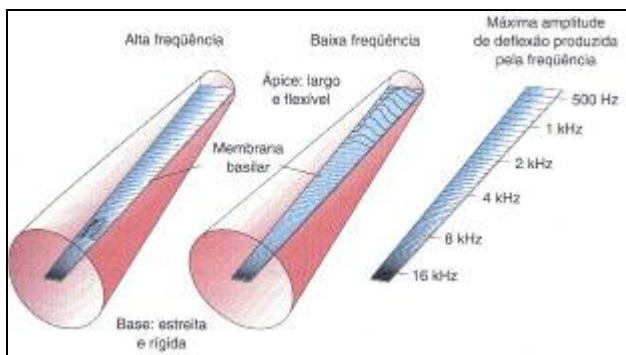


Figura 9 – BEAR et al.

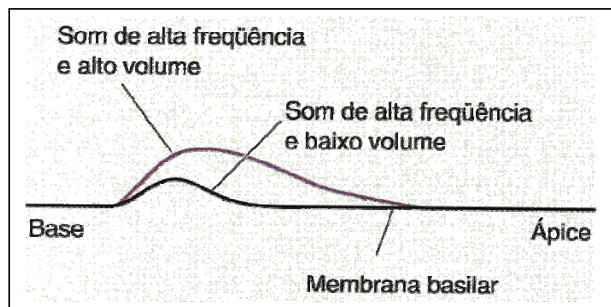


Figura 10 – BEAR et al.

Mas a membrana basilar não se comporta da mesma maneira para sons de frequências diferentes. Isso se deve a duas propriedades estruturais que ela possui: é cerca de cinco vezes mais larga no ápice do que na base e, conseqüentemente, a rigidez do ápice é muito menor do que na base – fator 100 ou 10 000 conforme Bear et al e Roederer respectivamente.

A energia de uma onda sonora está diretamente associada à frequência da onda.

Se a frequência for alta, a base mais rígida da membrana vibrará muito, dissipando a maior parte da energia e a onda não propagará para muito longe. Sons de baixa frequência, contudo, geram ondas que se propagarão até o ápice flexível da membrana antes que a maior parte da

energia tenha se dissipado (Bear et al, 2002, p. 360). Podemos observar esse fenômeno fixando uma das extremidades de uma régua numa mesa e colocando-a vibrar na outra extremidade (como um trampolim). Fixando-a em diferentes pontos de seu comprimento, obteremos diferentes frequências de vibração, gerando sons mais graves ou mais agudos.

Em outras palavras, para cada frequência existe uma região de estimulação máxima, ou “região de ressonância”, na membrana basilar (Roederer, 1998, p. 48).

Os movimentos da membrana basilar estimulam os sensíveis órgãos de Corti, que se estendem sobre a membrana, por todo o seu comprimento. A posição da ondulação de maior amplitude na membrana basilar, determinará qual parte do órgão de Corti será ativada, transformando as informações em impulsos elétricos para serem enviados ao encéfalo o, via nervo auditivo.

A figura 11 mostra uma região da membrana basilar em corte. A membrana propriamente não aparece, pois fica localizada abaixo da estrutura que são os órgãos de Corti. Estes são formados por células ciliadas externas, células ciliadas internas e seus estereocílios.

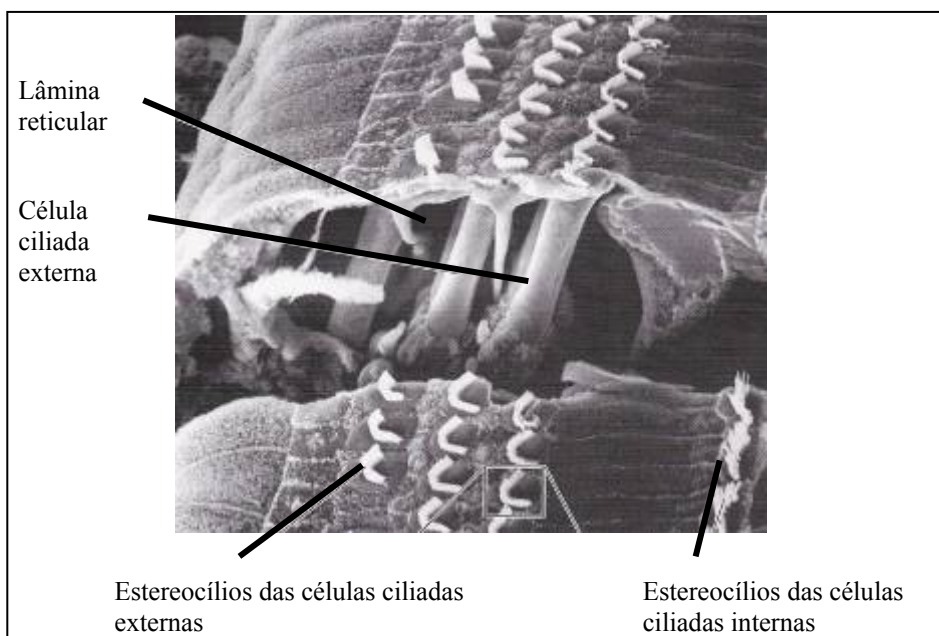


Figura 11 – Adaptada BEAR et al.

As células ciliadas internas estão dispostas em uma única fileira e somam aproximadamente 3.500 células. As células ciliadas externas estão dispostas em três fileiras que, juntas, têm entre 15.000 e 20.000 células.

As células ciliadas são assim chamadas, pois cada uma possui aproximadamente 100 estereocílios (em média com 5µm de comprimento) que se projetam para fora da membrana reticular.

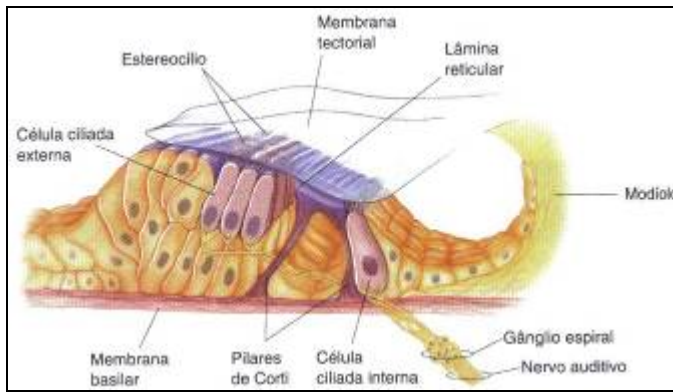


Figura 12 – BEAR et al.

Vamos analisar a estrutura do órgão de Corti, em corte transversal na figura 12:

- 1) os pilares de Corti estendem-se entre a lâmina reticular e as membranas basilares, dando sustentação estrutural ao órgão;
- 2) as células ciliadas externas e internas – que são os receptores auditivos – estão rigidamente conectadas entre a lâmina reticular e a membrana basilar e aos pilares de Corti. Essas estruturas movem-se como uma unidade, devido aos movimentos transmitidos pela membrana basilar;
- 3) os cílios dessas células são os chamados estereocílios;
- 4) a membrana tectorial é um tecido gelatinoso, suspenso na endolinfa que estende-se do modíolo – parte central da cóclea – e fica em contato com as pontas dos estereocílios das células ciliadas externas;
- 5) o gânglio espiral contém os neurônios ou células nervosas - que são as unidades fundamentais de processamento e transmissão dos sinais gerados.

Quando a membrana basilar move-se para cima, a lâmina reticular move-se para cima e em direção ao modíolo. Inversamente, o movimento para baixo da membrana basilar faz com que a lâmina reticular mova-se para baixo, afastando-se do modíolo. Quando a membrana reticular se move, aproximando-se ou se afastando do modíolo, também o faz igualmente com relação à membrana tectorial. Pelo fato de a membrana tectorial firmar as extremidades dos estereocílios das células ciliadas externas, a movimentação lateral da lâmina reticular em relação à membrana tectorial desloca os estereocílios dessas células para um lado ou para o outro (Bear et al, 2002, p. 362). Os estereocílios das células ciliadas internas estão suspensos na endolinfa.

Observe a figura 13.

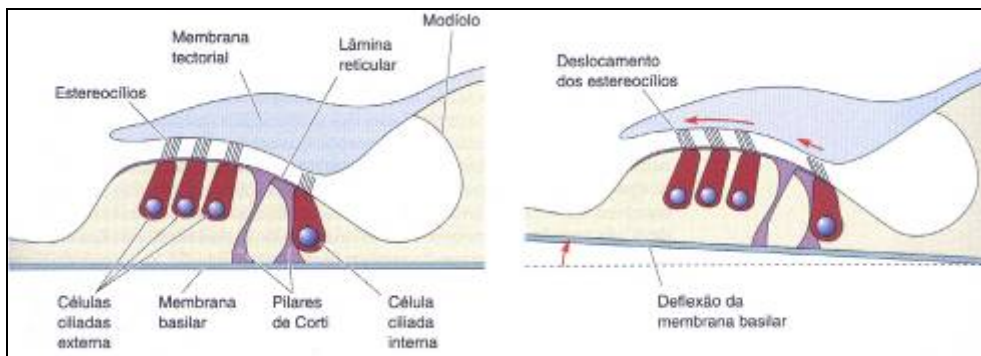
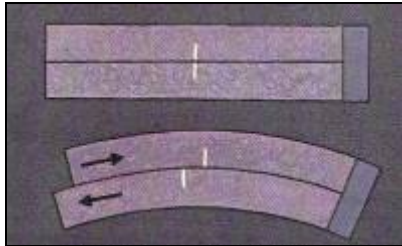


Figura 13 – BEAR et al.

Então, a membrana basilar transmite os movimentos aos estereocílios das células ciliadas internas e externas de maneira diferenciada:

- as extremidades dos estereocílios das células ciliadas externas em contato com a membrana tectorial movem-se de acordo com o deslocamento desta (*as forças mecânicas interativas dependem da distorção momentânea da partição coclear*) e,
- as extremidades livres dos estereocílios das células ciliadas internas movem-se de acordo com a velocidade da endolinfa (*a força sobre um obstáculo imerso num fluido viscoso é proporcional à velocidade do fluxo*).

O movimento, em sentidos contrários, da membrana basilar e da membrana tectorial é chamado ação de corte.



Se duas membranas flexíveis são unidas numa extremidade e então encurvadas, movem-se em sentido contrário uma à outra.

No caso da estrutura em questão, o modíolo é a extremidade que une a membrana basilar e a membrana tectorial.

Figura 14 – STEVENS, S. S. & WARSHOFSKY, F.

Como o órgão de Corti gera sinais elétricos e os envia ao cérebro para que, finalmente, este interprete os sons?

O movimento dos estereocílios das células ciliadas dá início a uma série de processos eletroquímicos nessas células. Para entender como esses processos eletroquímicos ocorrem, vamos discutir a composição química da perilinfa e da endolinfa, líquidos que preenchem a cóclea.

A perilinfa, líquido na escala vestibular e timpânica, tem baixas concentrações de K^+ (0,007 mol) e altas concentrações de Na^+ (0,14 mol). A endolinfa, líquido na escala média – diferente da maioria dos líquidos dos espaços extracelulares e cavidades no corpo, tem altas concentrações de K^+ (0,15 mol) e baixas concentrações de Na^+ (0,001 mol). A membrana de Reissner separa os dois líquidos. Mas por ser muito delgada – tem a espessura de duas células – permite que Na^+ da perilinfa seja absorvido pela estria vascular (veja Fig. 6) que secreta K^+ na endolinfa. Esse processo deixa a endolinfa com um potencial elétrico cerca de 0,08 volts (80mV) mais positivo que a perilinfa.

O processo de geração do sinal elétrico, que será enviado ao encéfalo através dos neurônios auditivos, inicia quando os estereocílios se curvam devido ao movimento da membrana basilar e da endolinfa, abrindo e fechando o escoamento de K^+ – altamente concentrado na endolinfa – para dentro da célula ciliada.

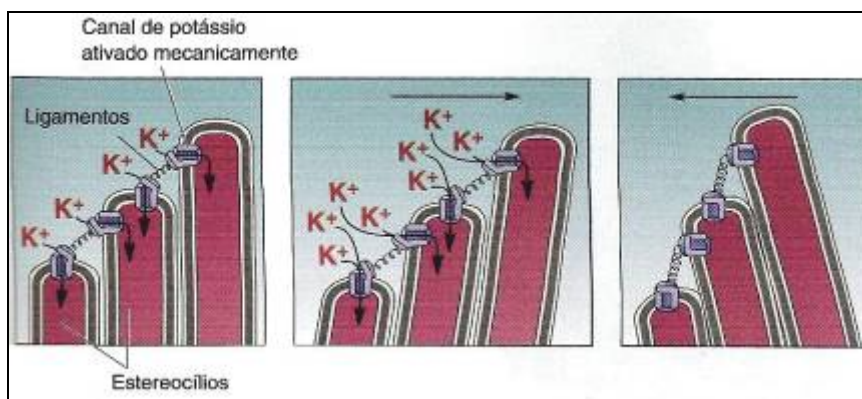
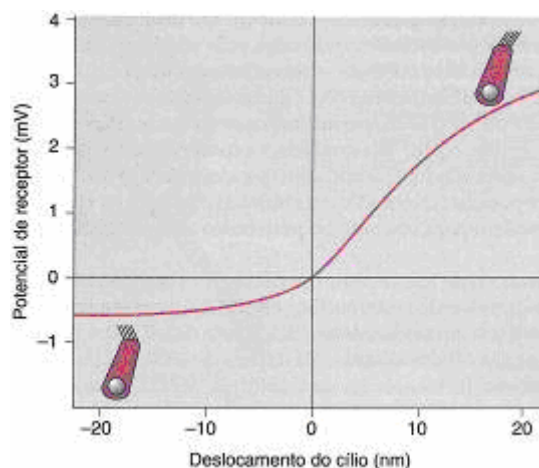


Figura 15 – BEAR et al.

Cada estereocílio está ligado por um filamento elástico, à parede do cílio adjacente. Quando os cílios estão apurados, a tensão sobre esse filamento mantém o canal em um estado parcialmente aberto, permitindo um pequeno escoamento de K^+ da endolinfa para dentro da célula ciliada. O deslocamento dos cílios em uma direção aumenta a tensão sobre o filamento de ligação, aumentando a corrente de entrada de K^+ . O deslocamento dos cílios na direção oposta libera a tensão sobre o filamento de ligação, permitindo, assim que o canal se feche completamente, prevenindo o influxo de K^+ (Bear et al, 2002, p. 36). Observe a figura 15.

Um som extremamente forte provoca o maior deslocamento da membrana basilar e conseqüentemente dos estereocílios: aproximadamente 20 nm ($1\text{nm}=10^{-9}\text{m}$). Um som extremamente fraco desloca os estereocílios apenas 0,3 nm – diâmetro aproximado de um átomo grande!



Quando os estereocílios deslocam-se em uma direção, a célula ciliada despolariza e quando se deslocam na outra, a célula hiperpolariza, com isso as células ciliadas geram um potencial de receptor que despolariza e hiperpolariza alternadamente a partir do potencial de repouso de -70mV (Bear et al, 2002, p. 363).

Figura 16 – BEAR et al.

A mudança de potencial na célula ciliada gera o sinal elétrico que é enviado ao encéfalo através dos neurônios auditivos – os transmissores desse sinal que se localizam no gânglio espiral e nervo auditivo.

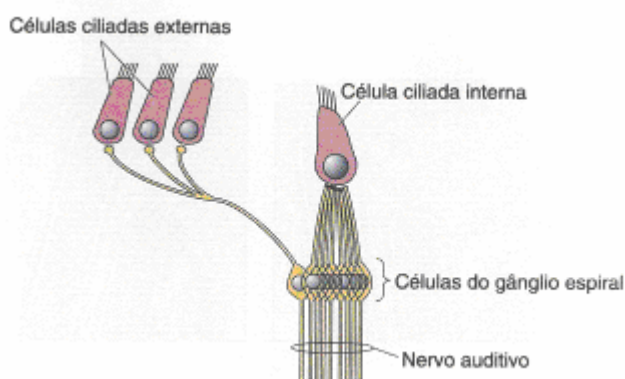


Figura 17 – BEAR et al.

Na figura 17 nota-se que há diferença no número de fibras do nervo acústico para as células ciliadas internas e externas: cerca de 95% das fibras do nervo acústico estão ligadas à célula ciliada interna, com 10 a 50 fibras individuais fazendo contato com cada célula. Isso faz com que as células ciliadas internas sejam, de fato, as receptoras sensoriais primárias.

Esse fato nos leva a concluir que a maior parte da informação auditiva provém das células ciliadas internas. Desse modo, qual é o papel das células ciliadas externas?

As células ciliadas externas agem como pequenos motores que amplificam o movimento da membrana basilar durante a percepção de um som de baixa intensidade, sendo conhecidas como amplificadores cocleares. Devido a essa amplificação, as células ciliadas internas deslocam-se mais e os processos eletroquímicos que ocorrem nelas produzem uma maior resposta no nervo auditivo.

Desse modo, as células ciliadas externas são receptores auxiliares e causadoras de processos eletroquímicos responsáveis pela amplificação do impulso elétrico. Concluimos que qualquer dano às células ciliadas externas deve reduzir severamente a audição, ainda mais para os sons menos intensos.

Por outro lado, a alta sensibilidade desses chamados “amplificadores cocleares” faz com que a maioria das pessoas com audição normal percebam sons (conhecidos como tinidos), mesmo em ambiente excepcionalmente silencioso. Alguns ouvidos – geralmente com cócleas danificadas – podem chegar a gerar sons pelo deslocamento súbito da musculatura do ouvido médio. Estes podem ser tão intensos, que são percebidos por outra pessoa que esteja próxima. Quando um som é emitido espontaneamente pelo ouvido (na ausência de qualquer estímulo exterior), é chamado de emissão otoacústica.

Assim como as funções desempenhadas nos demais órgãos do corpo humano, o encéfalo tem uma participação fundamental no processo da audição: é ele que interpreta e seleciona os sinais sonoros recebidos pelo ouvido. Diferentes regiões dele processam, analisam e interpretam diferentes propriedades do som.

É através do encéfalo que os sons fazem sentido para nós – mesmo que escutemos muito bem, quando ouvimos alguém falar uma língua que não conhecemos, os sons não são interpretados significativamente pelo encéfalo, e não entendemos nosso interlocutor. Mesmo durante o sono o cérebro atua sobre os sons que ouvimos: uma pessoa pode dormir com o barulho de uma televisão e, apesar disso, acorda prontamente ao chamado de um despertador o telefone.

Conclusões

O estudo do sistema auditivo e o processo da audição humana favorecem o estudo de uma quantidade significativa de fenômenos físicos associados a esse sentido. Os conceitos físicos apresentam-se de forma indissociada de conceitos de outras áreas, como Biologia e Química. Assim este estudo permite, através da aplicação de conceitos multidisciplinares à compreensão do funcionamento do próprio corpo humano, uma aprendizagem significativa para os estudantes.

Também é possível sugerir uma gama considerável de temas para pesquisa e aprofundamento que os professores poderão desenvolver ou propor aos seus alunos, envolvendo conceitos físicos, biológicos e químicos associados ao som e ao processo da audição. Seguem alguns exemplos:

- Os neurônios: estrutura e funcionamento.
- Sistema vestibular, órgão do equilíbrio que se encontra no ouvido interno;
- Ultra e infra-sons na audição de animais;
- Ultra-sonografia na prevenção e tratamentos médicos;
- Área de atuação do médico especialista em otorrinolaringologia;
- Audiometria e avaliação da percepção individual auditiva;
- Doenças do sistema auditivo: causas, tipos e tratamentos;
- Surdez “natural” e provocada: o uso medicamentos perigosos e drogas, agressão por *walkmans* ou ambientes barulhentos;
- Emissões otoacústicas: porque e em quais situações o ouvido pode gerar barulhos?
- Influência da educação musical na percepção de sons em pessoas de diferentes faixas etárias;

- Educação musical para surdos: percepção da música através das vibrações.

O material apresentado foi produzido a partir de bibliografias disponíveis apenas em meios universitários especializados e, como mencionado anteriormente, excede em muito o que se encontra em livros didáticos de nível básico. Devido à complexidade do assunto faz-se necessário que o professor estude o texto antes de apresentar o painel e selecione, de acordo com o nível escolar e interesse de seus alunos, a profundidade de abordagem. O objetivo deste texto é o de facilitar o acesso do professor a informações mais amplas sobre assunto de tal complexidade, servindo de apoio na exploração do pôster como recurso didático em sala de aula.

Referências

BEAR, M. F.; CONNORS, B. W. & PARADISO, M. A. Neurociências: desvendando o sistema nervoso. coord. trad. Jorge Alberto Quillfeldt et al. 2. ed. Porto Alegre: Artmed, 2002.

OKUNO, E.; CALDAS, I. L. & CHOW, C. Física para Ciências Biológicas e Biomédicas. São Paulo: Harper & Row do Brasil, 1982.

STEVENS, S. S.; WARSHOFSKY, F. Biblioteca Científica Life: Som e Audição. Rio de Janeiro: Livraria José Olympio Editora S.A., 1965.

PERRENOUD, F. Novas Competências para Ensinar. Trad. Patrícia Chittoni Ramos. Porto Alegre: Artes Médicas Sul, 2000.

Parâmetros Curriculares Nacionais. v. 4. Ciências Naturais 5^a a 8^a séries.

GASPAR, A. Física. Volume 2. São Paulo: Editora Ática, 2000.

UFRGS - Concurso Vestibular 2002, prova de Física questão 23.

Dicionários Técnicos Melhoramentos – Física, 1980.

WISNIK, J. M. O som e o sentido – uma outra história das músicas. São Paulo: Companhia das Letras, 1999.

ROEDERER, J. G. Introdução à Física e Psicofísica da Música. Trad. Alberto Luis da Cunha. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1998.

JOURDAIN, R. Música, Cérebro e Êxtase: como a música captura nossa imaginação. Rio de Janeiro: Editora Objetiva Ltda., 1998.