

# Capítulo 3.

## O Sistema Auditivo Humano

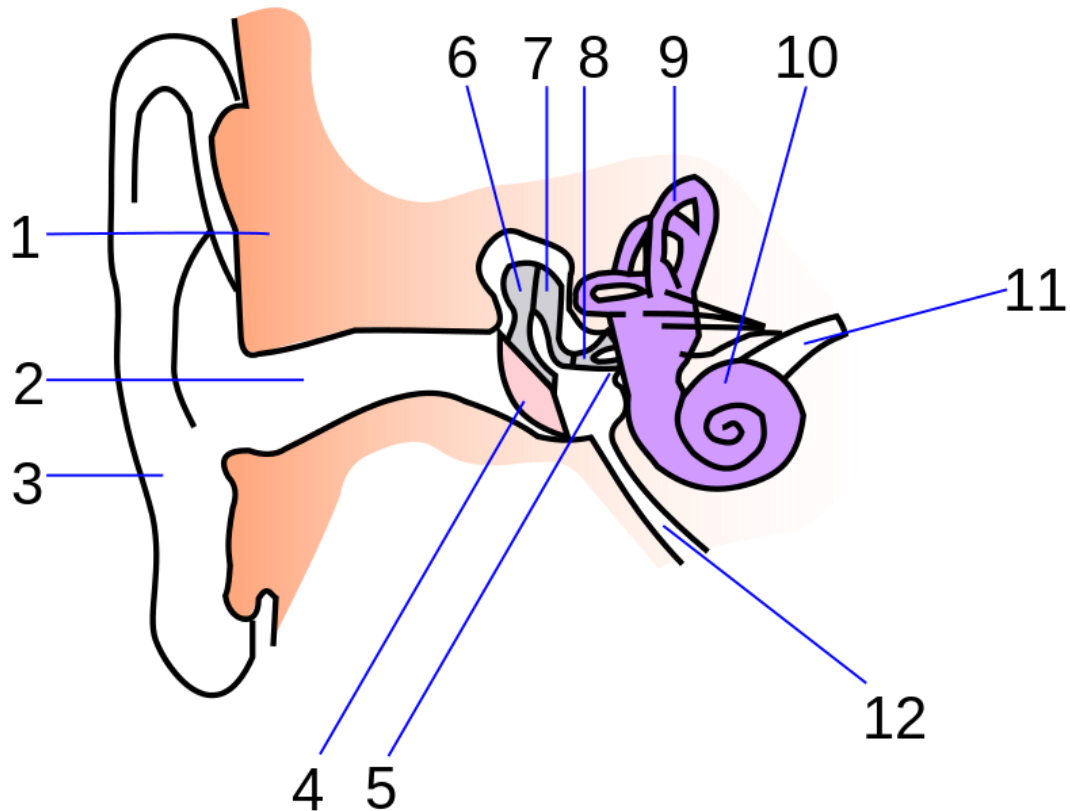
### Sumário

|  |    |
|--|----|
| Introdução.....  | 1  |
| Anatomia da Orelha (Sistema Auditivo Periférico) ..... | 1  |
| A Orelha Externa .....                                 | 2  |
| A Orelha Média .....                                   | 5  |
| A Orelha Interna.....                                  | 6  |
| Resposta em Frequência nos Nervos Auditivos .....      | 12 |
| Bibliografia .....                                     | 15 |

### Introdução

#### Anatomia da Orelha (Sistema Auditivo Periférico)

Podemos subdividir a Orelha em três partes, a Orelha Externa, a Orelha Média e a Orelha Interna. A tarefa de captação das ondas mecânicas sonoras (acústicas) é realizada em grande parte pela **Orelha Externa**, formada pelo Pavilhão Auditivo Externo (antigamente denominada de Orelha), pelo Conduto Auditivo Externo (ou Canal Auditivo) e pelo Osso Craniano, ilustrados respectivamente pelos números (3), (2) e (1) da Figura 1. Na mesma figura, o Tímpano (4) é uma membrana que acopla a Orelha Externa à **Orelha Média**, incumbida de efetuar o acoplamento mecânico, ou realizar o casamento da impedância acústica, e na figura é ilustrada pelos pequenos ossos Martelo (6), Bigorna (7) e Estribo (8); o equilíbrio entre a pressão externa e interna devido às vibrações do Tímpano é realizado pelo Tubo de Eustáquio (12), que está conectado à faringe. A Janela Figura 1Oval (5) conecta a Orelha Média à **Orelha Interna**, que fará a transdução mecânica-elétrica na Cóclea (10) e transmitirá esses sinais elétricos através dos Nervos Auditivos (11); cabe também a Orelha Interna a percepção para o Equilíbrio Tridimensional, captada pelo Labirinto (9) através de seus três canais semicirculares.



*Figura 1*

Anatomia da Orelha. 1 – Osso craniano; 2 – Conduto Auditivo Externo (antes denominado de Canal Auditivo); 3 – Pavilhão Auditivo (Antes denominada de Orelha); 4 – Tímpano; 5 – Janela Oval; 6 – Martelo; 7 – Bigorna; 8 – Estribo; 9 – Labirinto; 10 – Cóclea; 11 – Nervos Auditivos; 12 – Tubo de Eustáquio.

Uma animação que ilustra como ocorre o processo de captação das ondas sonoras (acústicas) pelo Sistema Auditivo Humano, mostrando a funcionalidade de todas as partes da Orelha (Externa, Média e Interna), pode ser vista em (Siemens Audiology, 2014).

## A Orelha Externa

A principal finalidade da Orelha Externa é acoplar de forma eficiente a pressão sonora externa, em campo Livre ( $p_L$ ), a pressão no Tímpano ( $p_T$ ), como aparece na Figura 2. Neste sentido dois processamentos são importantes: (i) a captação eficiente do som na cabeça

(incluindo pelo osso craniano) e (ii) a Sensibilidade Direcional do par de Orelhas Externas, para a localização das fontes sonoras.

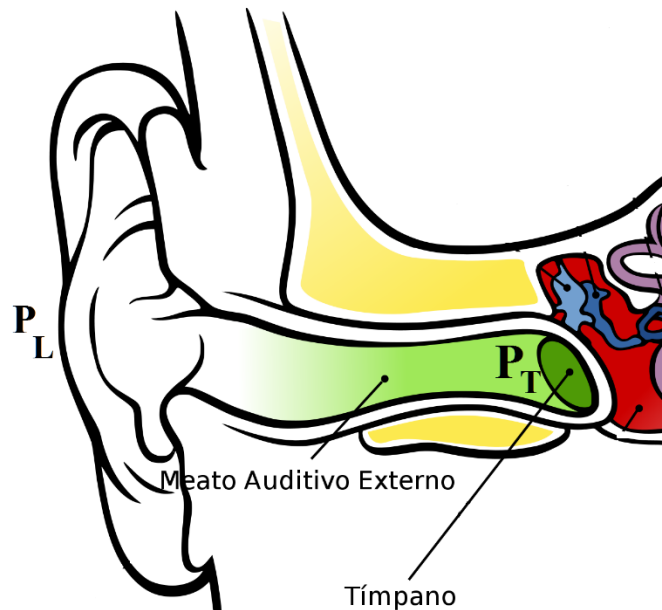


Figura 2. Pressões na Orelha Externa, onde  $P_L$  é a pressão de campo Livre e  $P_T$  a pressão no Tímpano

O ganho de pressão sonora obtido na Orelha Externa, entre a pressão no Tímpano,  $p_T$ , e a pressão Livre incidente,  $p_L$ , pode ser ilustrado pelo gráfico da Figura 3, onde podemos observar que entre 2 e 3 kHz ocorre um máximo com cerca de 18 dB e estendendo-se até cerca de 5 kHz o ganho é maior que 10 dB, mostrando que a captação sonora pela Orelha Externa nesta faixa de frequência possui a maior eficiência. Nas frequências baixas, essa eficiência decai, que segundo (Rossing, 2014) ocorre devido ao comprimento de onda estar fora da faixa de ressonância do conduto auditivo externo (ou canal auditivo) e o aumento da impedância acústica na Orelha Média. Em frequências altas, em torno de 10 kHz, ocorre inclusive uma atenuação na pressão, que pode ser entendida como uma proteção a sons muito agudos com alta pressão sonora.

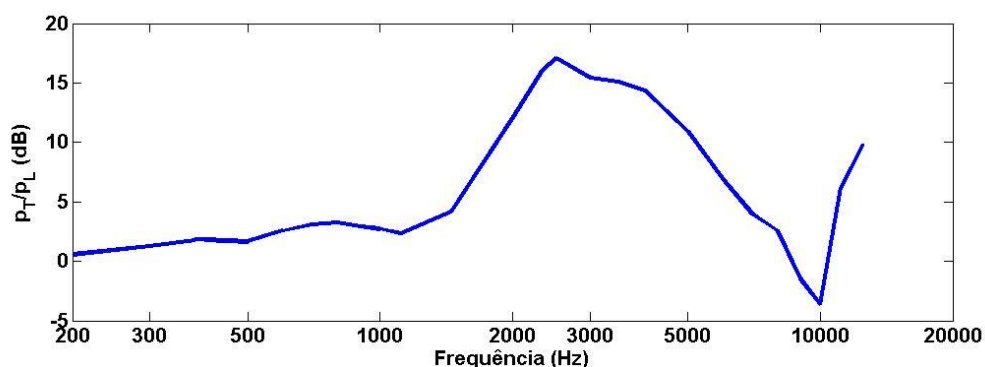


Figura 3- Ganho de Pressão sonora na Orelha Externa

Outra função importante do par de Orelhas Externas é a Sensibilidade Direcional, que faz com que a função de transferência da Orelha Externa seja diferente dependendo da direção da fonte, como ilustra a Figura 4. Assim sendo, sons de faixa larga serão captados de forma diferente,

dependendo da posição de que eles venham em direção à Orelha, fazendo com que consigamos localizar a origem deles. Essas diferenças na captação devem-se às ressonâncias e anti-ressonâncias que ocorrem na estrutura anatômica da cartilagem do Pavilhão Auditivo (ou a popular “orelha”) e no Conduto Auditivo (vide Figura 5), diferenciando sons que se originam nas posições frontais, laterais ou traseiras. As anti-ressonâncias ocorrem devido à interferência destrutiva entre a propagação direta e o eco sonoro no Conduto Auditivo Externo, possuindo uma transferência tipo Rejeita-Faixa com atenuação de até -20 dB em ângulos de  $\pm 15^\circ$  de azimuth, geralmente entre 3 e 10 kHz (Rossing, 2014). Esta seletividade em frequência com o ângulo de chegada na Orelha Externa auxilia no processamento subsequente, quando as informações de ambos Pavilhões Auditivos são analisadas.

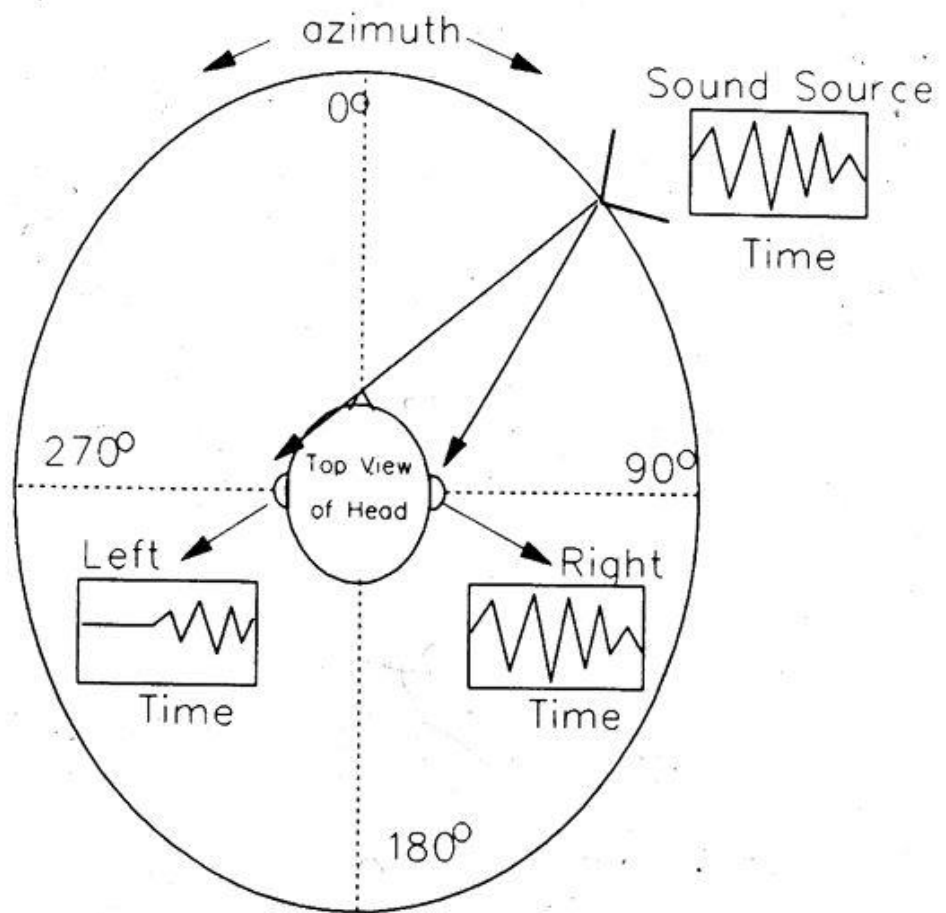


Figura 4. Sensibilidade Direcional diferente no Par de Orelhas, para localização da Direção da Fonte Sonora

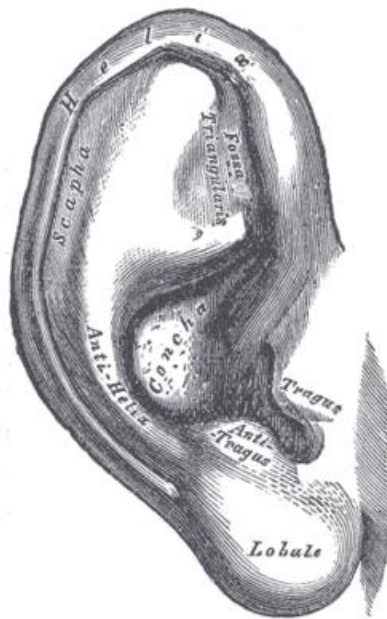


Figura 5. Anatomia do Pavilhão Auditivo. As saliências e reentrâncias juntamente com o Conduto Auditivo propiciam a formação de ressonâncias e anti-ressonâncias no Sistema Auditivo.

## A Orelha Média

Na Orelha Média ocorre o acoplamento adequado entre a pressão sonora captada pelo ar pela Orelha Externa ( $p_T$ ) com a pressão no fluido presente na Cóclea ( $p_V$ ), processo que pode ser visualizado na Figura 6. Pode-se modelar este processo como um acoplamento entre as impedâncias acústicas específicas<sup>1</sup> da região do Tímpano (3), que é o ar, e na superfície da Janela Oval em contato com a Cóclea (na cavidade Vestibular), do lado oposto ao Estribo (4), preenchida com um líquido denominado perilinfa. Com a mudança de meio a velocidade do som muda, assim como ocorre com a luz no efeito da refração luminosa: esta mudança de velocidade pode ser quantificada pela diferença entre as impedâncias acústicas dos meios. A função da Orelha Média é de efetuar essa transformação de impedância de modo a maximizar a energia sonora transferida, ou seja, minimizar a perda de informação sonora para a Cóclea. O tímpano e a janela oval atuam como pistões e os ossículos martelo, bigorna e estribo atuam como um sistema de alavanca para proporcionar uma vantagem ou ganho mecânico no conjunto vibratório. Se o sistema fosse perfeito, o ganho mecânico  $p_V/p_T$  seria da ordem de 36 dB (quase obtido no gato), mas no homem é de 29 vezes, ou perto de 15 dB, em frequências próximas a 3 kHz (Rossing, 2014). Problemas na Orelha Média que afetem essa transformação de impedância causam grande diminuição de sensibilidade sonora.

<sup>1</sup> A Impedância Acústica Específica é a relação entre a pressão sonora e a velocidade de partículas de uma onda plana propagando-se pelo meio em questão:  $Z_{ac} = p/v_p$

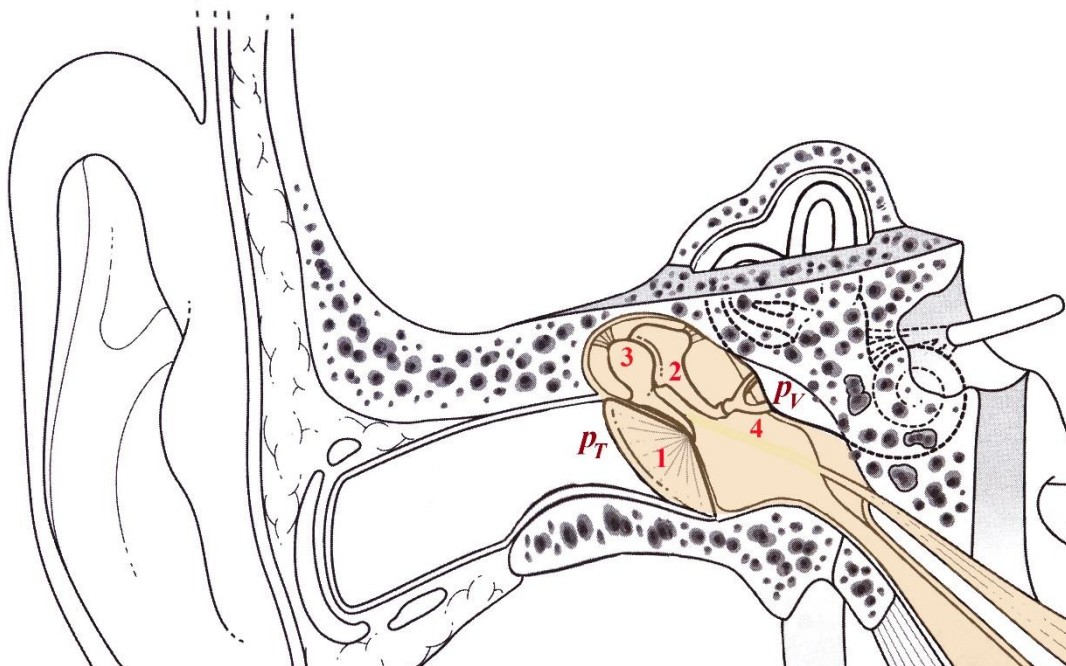
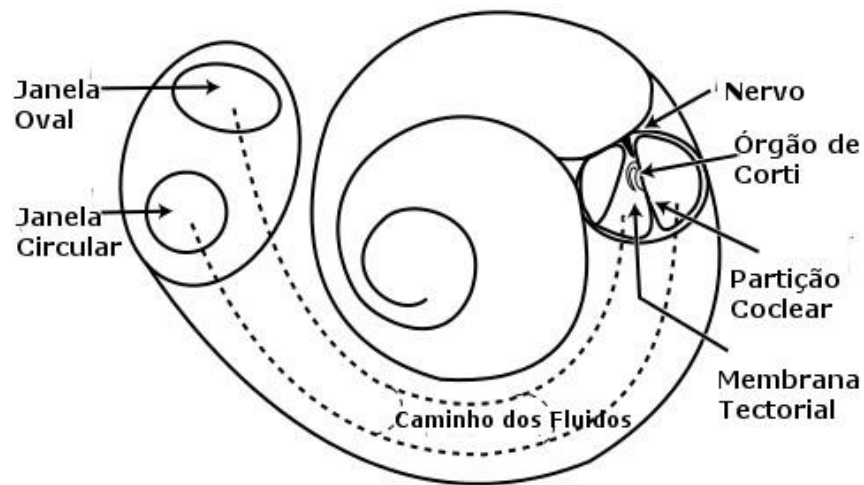


Figura 6 – Acoplamento de Pressão na Orelha Média,  $p_T$  pressão no Tímpano e  $p_V$  pressão Vestibular. 1 – Tímpano, 2 – Bigorna, 3 – Martelo, 4 – Estribo em contato com a Janela Oval.

## A Orelha Interna

A transdução acústica (mecânica) para sinais elétricos é realizada na Orelha Interna, mais especificamente na Cóclea, e transmitida para o cérebro pelos Nervos Auditivos. A Cóclea recebe este nome devido ao formato em caracol, como pode ser observado na Figura 7, onde a Janela Oval interliga a extremidade do Duto (Vestibular) preenchido com Fluido Líquido (perilíngua, basicamente NaCl diluído com baixa concentração de  $K^+$ ), sendo que um corte transversal revela a posição do Nervo (auditivo), da Partição Coclear que subdivide a Cóclea em dois dutos, o Órgão

de Corti que contém as células transdutoras suportadas pela Membrana Tectorial (ou Vestibular).



*Figura 7. Ilustração do formato em caracol da Cóclea com cerca de 3,5 voltas. A entrada das ondas sonoras ocorre pela Janela Oval percorrendo a Cóclea internamente pelos caminhos (ou dutos) preenchidos por fluidos. Num corte transversal meramente ilustrativo mostra-se um Órgão de Corti sob a Membrana Tectorial, que contém as células transdutoras acústico-elétricas, sendo os impulsos transmitidos pelo Nervo Auditivo.*

Em corte transversal mais acurado da Cóclea, podemos visualizar na Figura 8 a anatomia dos dutos (ou caminhos) na Cóclea, o Vestibular (*Scala Vestibuli*), o Timpânico (*Scala tympani*) e entre eles o Médio (*Scala Media*), onde ficam os Órgãos de Corti, suportados pelas Membranas Basilares. A Membrana Vestibular separa o duto Médio do Vestibular e os Nervos Cocleares



(auditivos) antes de conectarem-se aos Órgãos de Corti formam gânglios espiralados ou “trançados”.

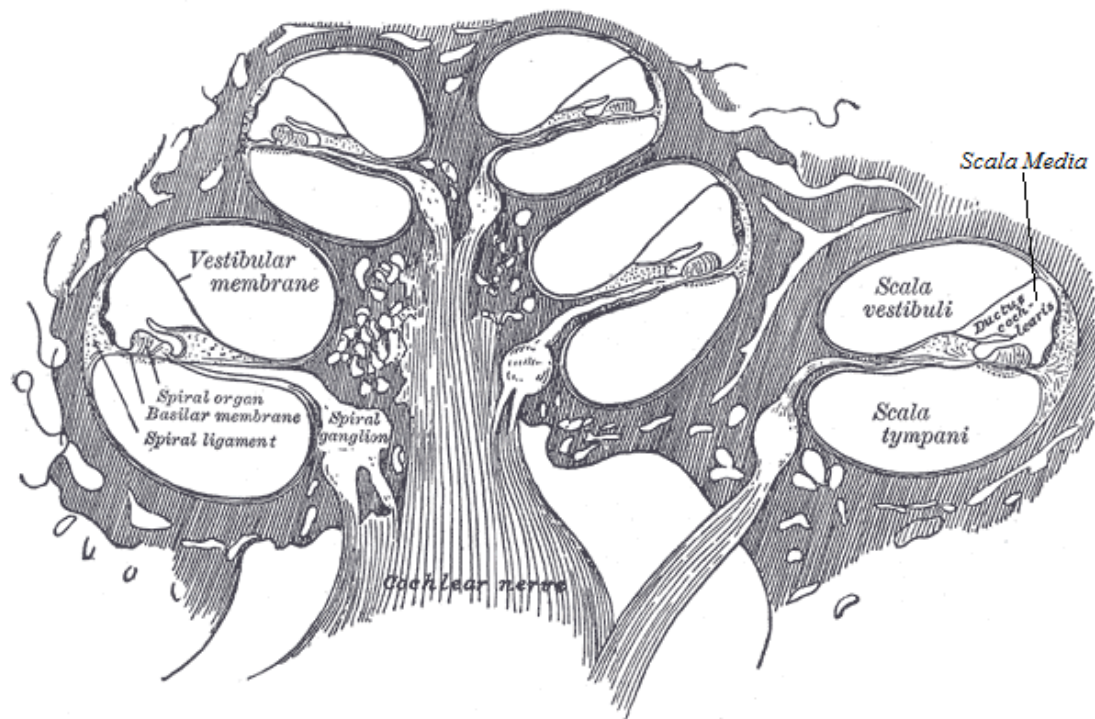


Figura 8. Ilustração de Corte Transversal na Cóclea. Os dutos principais Vestibular, Medio e Timpânico são preenchidos com soluções salinas, (perilinfã e endolinfã, que diferem entre si na concentração de potássio (maior na endolinfã).

As células no Órgão de Corti responsáveis pela transdução acústico-elétrica são denominadas células ciliadas (*hair cells*) e dependendo da posição na Cóclea são classificadas como interiores (*inner*) ou exteriores (*outer*), como se pode ver com mais detalhe na Figura 9. As células ciliares que transmitem informação acústicas para os Nervos Auditivos são as Interiores (*inner hair cells*)



enquanto a seleção tonal da informação acústica, ou seja a qual a faixa de frequência pertence essa informação acústica fica a cargo das células *outer hair cells* (Kern A, 2008).

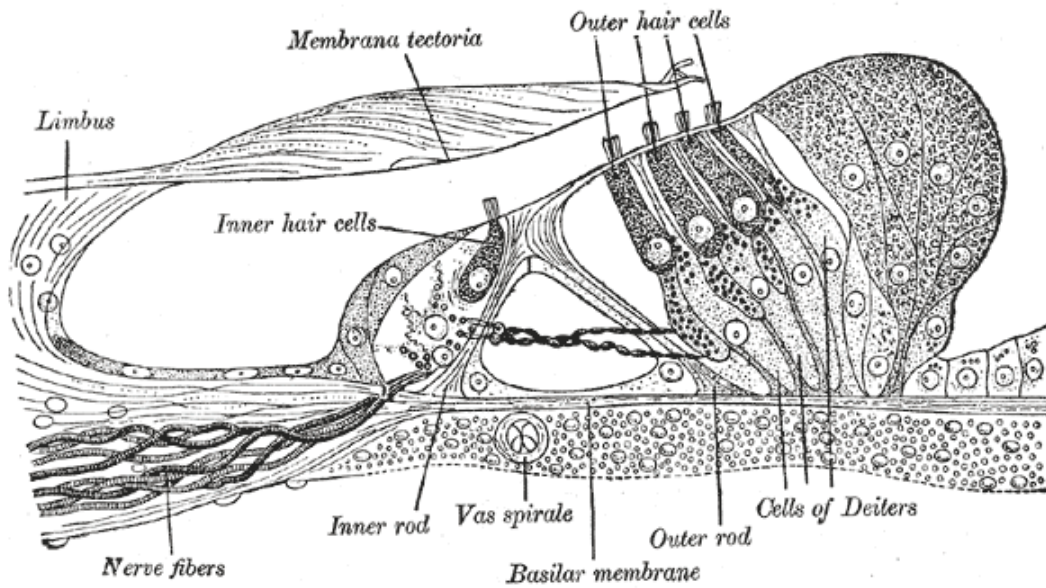


Figura 9 - Detalhe do Órgão de Corti na Cóclea. A Membrana Basilar separa as fibras Nervosas (**Nerve fibers**) Auditivas das células transdutoras ciliadas, Internas (**Inner hair cells**) e Externas (**Outer hair cells**).

A Cóclea também efetua uma análise em frequência do som, para auxiliar na percepção auditiva, como por exemplo, selecionar entre sons desejáveis de indesejáveis, identificar a voz humana e diferenciar *itches*. Além disso, a disposição espacial da membrana basilar (enrolada em espiral dentro da Cóclea) efetua um ajuste da faixa dinâmica da percepção sonora, aumentando-a, razão pela qual consegue-se obter uma faixa de até 100 dB com células transdutoras de sensibilidade entre 20 e 40 dB.

Se “desenrolarmos” a Cóclea, colocando a membrana basilar num plano, teremos as altas frequências (de menor comprimento de onda) sendo privilegiadas na base, perto da Janela Oval conectada ao Estribo (*stapes*, na origem 0) e as baixas frequências (de comprimento de onda

maior) sendo privilegiadas na ponta (*apex*, ou perto dos 30 mm da membrana basilar), conforme ilustra a Figura 10, onde as frequências centrais são mostradas.

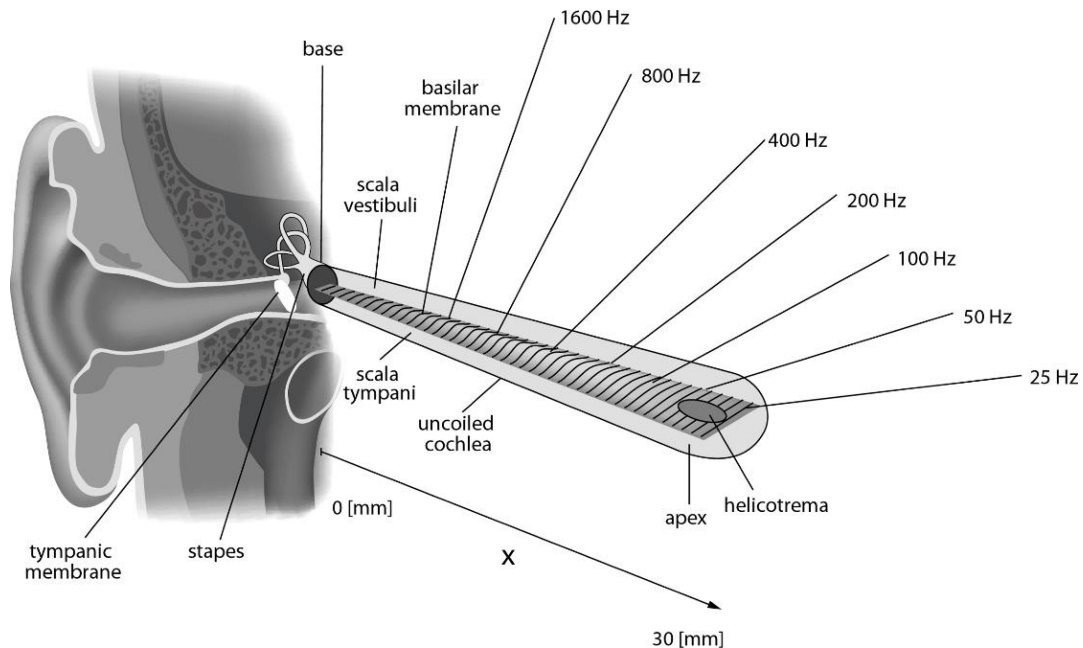


Figura 10. Análise de Frequência na Cóclea, ao longo da Membrana Basilar. (Kern A, 2008)

Podemos entender a necessidade de dois dutos, o Vestibular (SV) e o Timpânico (ST), pois a onda mecânica acústica precisa de um meio adequado para completar suas vibrações, conforme ilustra a Figura 11, onde em cada duto (*scala*) a onda acústica vibra com orientação positiva,  $p_v(x,y,t)$  ou negativa,  $p_t(x,-y,t)$  ao longo do tempo, depois da excitação temporal pelo Estribo ( $p_{st}$  de *stapes*) via Janela Oval (OW).

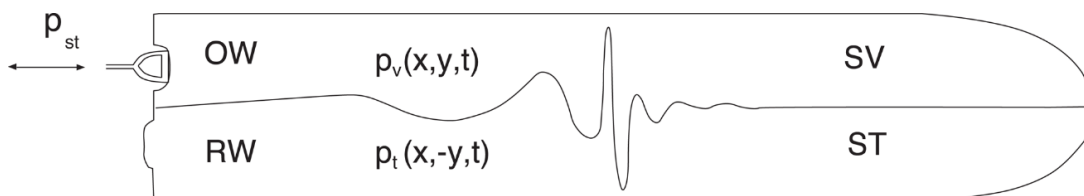


Figura 11. Modelo de Propagação da Onda Acústica na Cóclea. OW representa a Janela Oval e RW representa a Janela Circular; SV é o Duto Vestibular e ST é o Duto Timpânico, com suas respectivas pressões acústicas. A pressão no sonora temporal no Estribo é  $p_{st}$ .

Na Figura 12 está ilustrada uma simulação da vibração sonora ao longo da Membrana Basilar, com base em  $x = 0$  (na Janela Oval) em função de três frequências diferentes, 8 kHz, 2 kHz e 400 Hz. Para uma onda em 8 kHz são mostradas várias oscilações ao longo do tempo, enquanto para as demais apenas uma. Nota-se que a medida que a onda sonora fica mais aguda, a amplitude máxima do deslocamento ocorre perto da Base da Cóclea ( $x = 0$ ), atingindo no máximo 5 mm; para uma onda em 2 kHz a profundidade na Cóclea chega a 8 mm, e para uma onda em 400 Hz atingem-se 11 mm. Os arquivos para esta simulação podem ser obtidos em (Ellis, 2009).

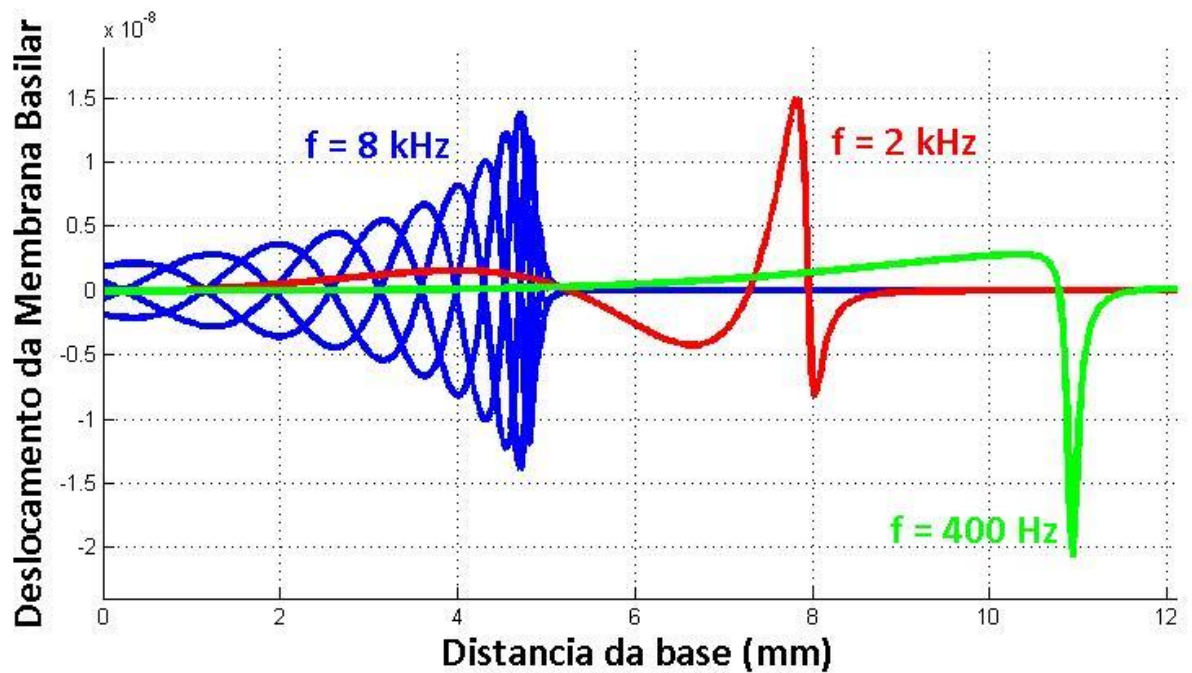


Figura 12. Vibrações na Membrana Basilar da Cóclea, para algumas frequências, em função da distância da base ( $x = 0$  na Janela Oval), para  $f = 8 \text{ kHz}$  (azul),  $2 \text{ kHz}$  (vermelho) e  $400 \text{ Hz}$  (verde).

Uma bela animação de como é realizada essa análise em frequência pela Cóclea pode ser encontrada em (Hudspeth, 1997) da Rockefeller University. Alguns modelos, como o **1-D Linear Cochlear Model**, do EAR@Lab da Boston University, em Matlab, como os utilizados na animação podem ser obtidos em (EAR@Lab, 2015).

A seletividade da resposta em frequência na Membrana Basilar também pode ser entendida como uma resposta variável a intensidades sonoras diferentes. Na Figura 13 temos as curvas de Sensibilidade (deslocamento da membrana sobre a pressão) para dois mamíferos diferentes, sendo intensidade sonora do sinal de entrada cuja frequência é varrida (de 20 a 22 kHz) incrementada em intervalos de 10 em 10 decibéis até 100 dB. As curvas com picos próximos a 9 kHz são da cóclea de uma chinchila e as com picos próximos a 18 kHz são da cóclea de um porquinho da Índia. Pode-se notar que em ambos os casos quanto menor a pressão sonora, maior a sensibilidade e mais acentuado é o pico da curva (maior Q). Assim, para intensidade sonora de 20 dB o ganho é alto e também o Q, sendo a sintonia fina, e para uma intensidade sonora de 100 dB o ganho é baixo, sendo o máximo ocorrendo quase meia oitava antes, com baixo Q, levando a uma sintonia faixa mais larga, na terminologia de filtros em frequência.

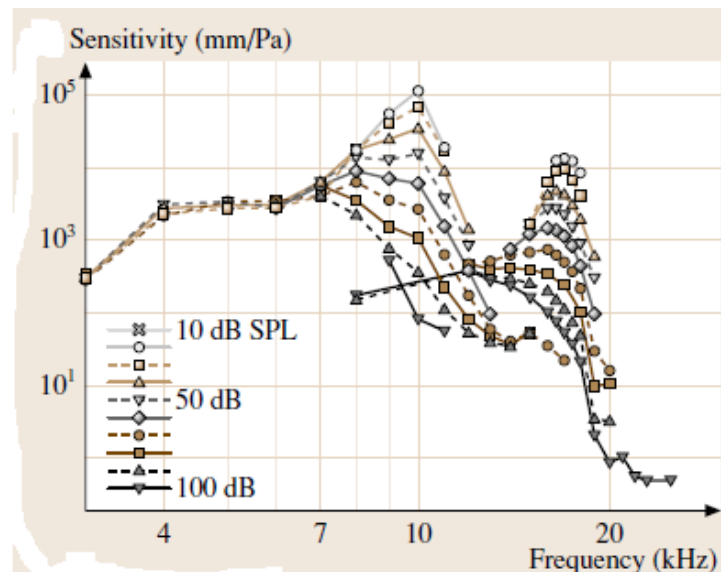
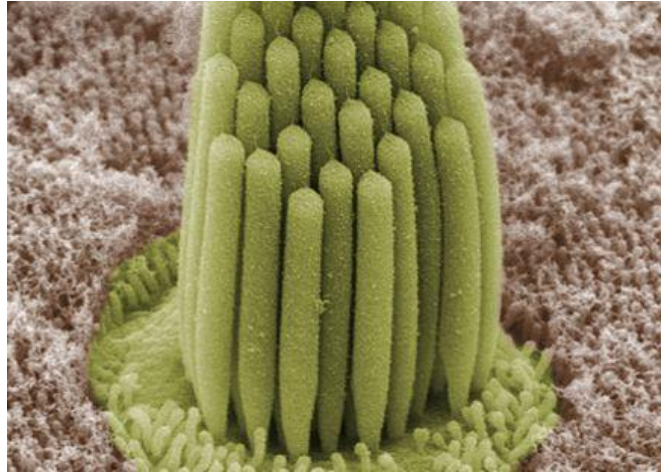


Figura 13. Sensibilidade na Membrana Basilar em função da frequência do sinal acústico para dois mamíferos diferentes. A pressão sonora dos tons de varredura de entrada varia de 10 a 100 dB em passos de 10 dB SPL. Picos próximos a 9 kHz são da Cóclea de uma chinchila e os próximos a 18 kHz são de um porquinho da Índia (extraído ainda sem permissão de (Rossing, 2014)).

O ganho na Cóclea varia com a pressão sonora do sinal, indicando assim sensibilidade variável; sons de menor intensidade possuem ganho maior e sons de maior intensidade possuem ganho menor; esta variação de ganho com a faixa dinâmica do sinal de entrada acarreta num efeito de compressão do sinal, o qual pode ter correlação para algumas características de percepção ao nível sonoro nas pessoas (Rossing, 2014).

## Resposta em Frequência nos Nervos Auditivos

Na sequência de nossa descrição, chegamos aos Nervos Auditivos, ou fibras Neurais. Trataremos aqui apenas algumas propriedades de interesse para as etapas de processamento e modelagem, sendo que um maior aprofundamento pode ser visto em (Daniel Pressnitzer, 2005) e (Rossing, 2014). As informações obtidas nas fibras Neurais basicamente dependem das propriedades da Membrana Basilar, codificadas pelas células ciliares internas (*inner hair cells*), que pode ser vista em detalhe na Figura 14, uma foto tirada com um MEV, um microscópio eletrônico de varredura.



*Figura 14. Foto de uma célula ciliada (inner hair cell) com microscópio eletrônico de varredura.*

Os sons acústicos são codificados nas fibras Neurais como potenciais de ação, ou por padrões temporais nos potenciais de ação. As fibras possuem atividade espontânea, podendo variar de quase zero a uma centena de disparos por segundo. Quando um som é transmitido, ocorrem novos estímulos, e os padrões podem ser como os da Figura 15b, onde resposta ao estímulo está graduada de acordo com a intensidade sonora (dB SPL), em função da frequência sonora. Na figura aparecem três conjuntos de fibras Neurais, correspondentes a regiões diferentes da Membrana Basilar. Como a sensibilidade a uma frequência diferente varia com a intensidade sonora, também o potencial de ação varia, e assim, cada curva verde representa o nível de intensidade sonora necessário em cada frequência para obter a mesma medida de potencial de ação na fibra Neuronal.

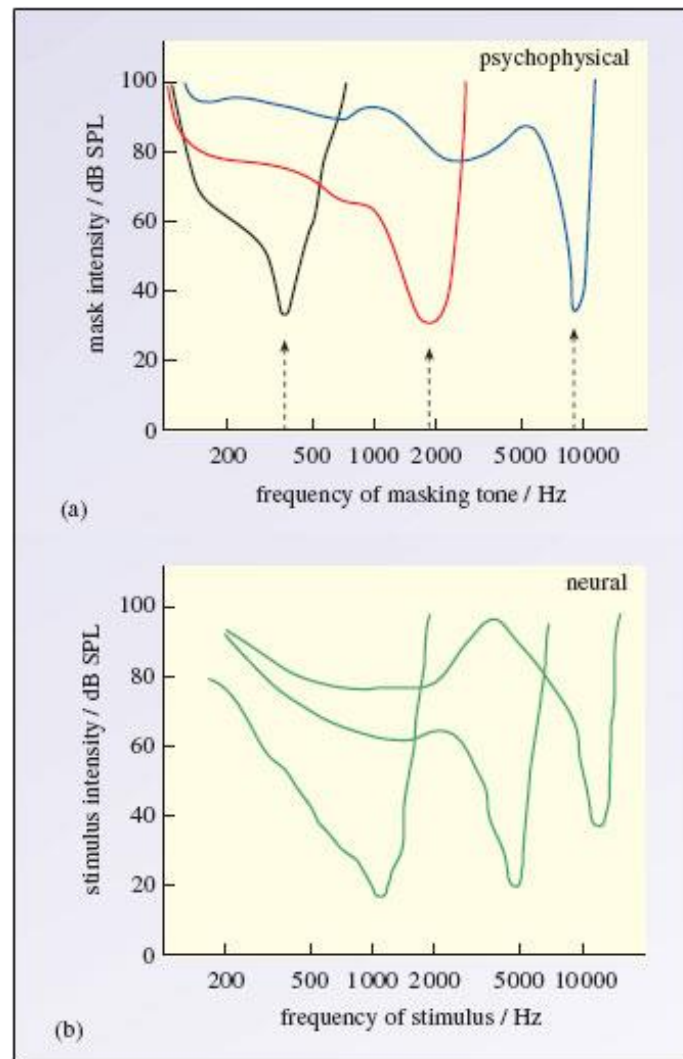


Figura 15. Curvas de Sintonia Neurais na Percepção Auditiva (Open University, 2013).

Pode-se observar na Figura 15 que conforme aumenta frequência de maior sensibilidade (menor valor do pico), denominada de Melhor Frequência (MF), mais seletivo é o formato da curva (Q maior), pois para a curva com MF de 11 kHz a seletividade é maior que para curva de MF em 5 kHz (Q médio) e esta é maior que para a curva de MF de 1100 Hz (Q menor). Esta característica indica uma análise em frequência no sistema auditivo com relação MF/Q constante.

Na parte superior, Figura 15a, temos as curvas resultantes de testes perceptivos, ou testes psicoacústicos, tipos de experimentos não invasivos, onde o ouvinte em cada tom senoidal de referência em 10 dB (indicado pelas setas tracejadas), escuta conjuntamente outro tom, de frequência maior ou menor, mas com intensidade maior, até que o tom de referência tenha sua percepção encoberta pelo segundo tom. As curvas em marrom para o tom de referência próximo a 400 Hz, em vermelho para o tom próximo a 1,9 kHz, em azul para o tom de 9 kHz indicam as respostas de **Mascaramento de Frequência**. O aspecto das curvas é muito similar ao aspecto das curvas de sintonia neurais da parte inferior, Figura 15b, apesar dos picos da MF não serem os mesmos nas máscaras, a semelhança levou a hipótese do processamento em frequência ser realizado por um banco de filtros de forma próxima a triangular, com a frequência central de cada filtro apropriadamente ajustada numa escala psicoauditiva.



## Bibliografia

- Daniel Pressnitzer, A. d. (2005). *Auditory Signal Processing: Physiology, Psychoacoustics, and Models*. Lyon: France: Springer.
- EAR@Lab. (2015, September 15). *1-D Linear Cochlear Model*. Tratto da <http://earlab.bu.edu/modeling/downloadable/Matlab.aspx>
- Ellis, D. (2009). *Speech and Audio Processing and Recognition*. Tratto il giorno September 15, 2015 da Columbia University - DEE E6820: <https://www.ee.columbia.edu/~dpwe/e6820/matlab.html>
- Hudspeth, L. (1997, September 15). *Graphical Simulations*. Tratto il giorno September 15, 2015 da Rockefeller University: <http://lab.rockefeller.edu/hudspeth/graphicalSimulations>
- Kern A, H. C.-H. (2008, August 29). Biophysical Parameters Modification Could Overcome Essential Hearing Gaps. *PLoS Computational Biology*, p. 1-9.
- Open University. (2013). *The Perception of Frequency*. Tratto il giorno Settembre 16, 2015 da OpenLearn Works: <http://www.open.edu/openlearnworks/mod/page/view.php?id=45917>
- Rossing, T. D. (2014). *Springer Handbook of Acoustics*. Stanford: Springer.
- Siemens Audiology. (2014). *How the hearing works*. Tratto il giorno settembre 15, 2015 da YouTube: [https://www.youtube.com/watch?v=ONJ\\_EAQjR3c](https://www.youtube.com/watch?v=ONJ_EAQjR3c)