

Sistema Auditivo Humano

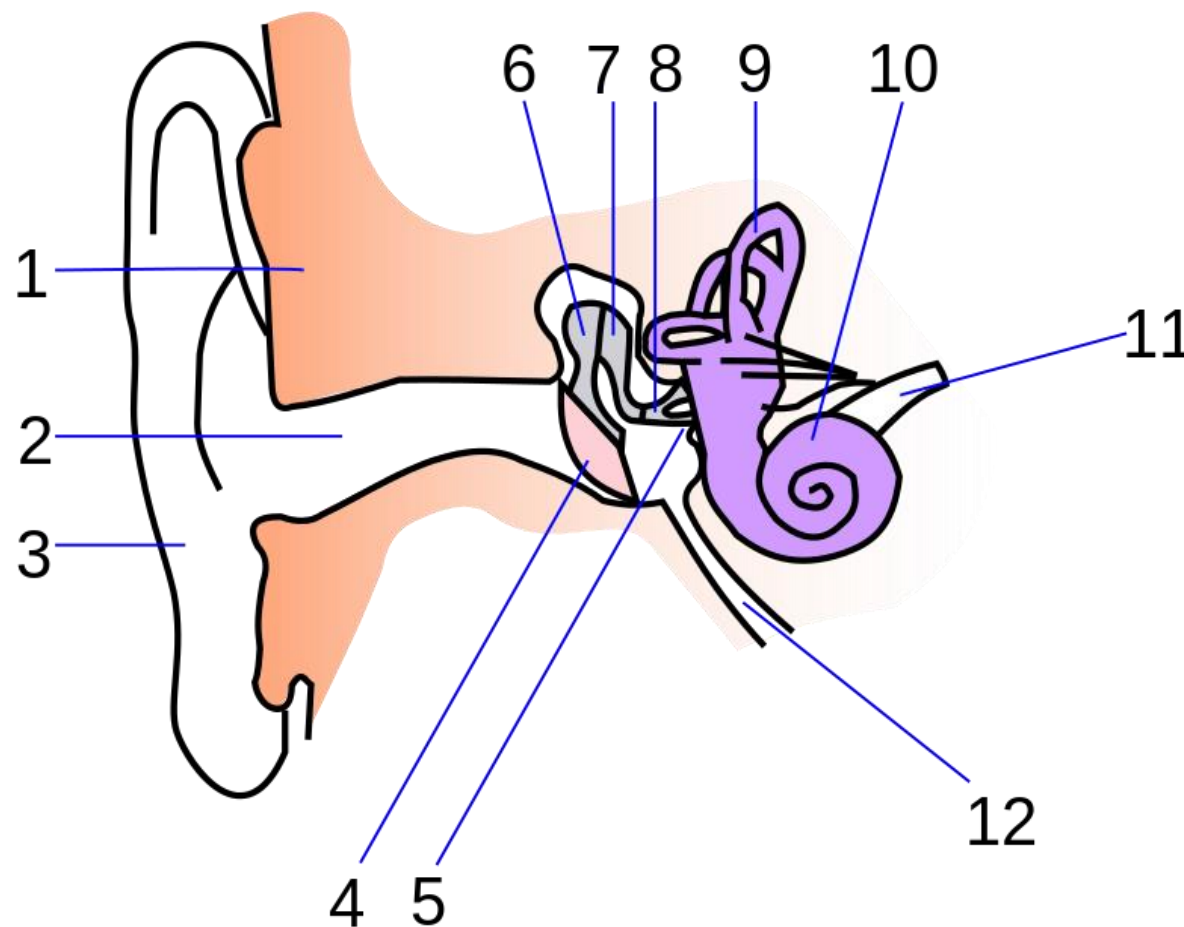
ESTI019 – Codificações de Sinais Multimídia

Profs. Celso S. Kurashima, Kenji Nose Filho e Mário Minami



Anatomia da Orelha (Sistema Auditivo Periférico)

- 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.

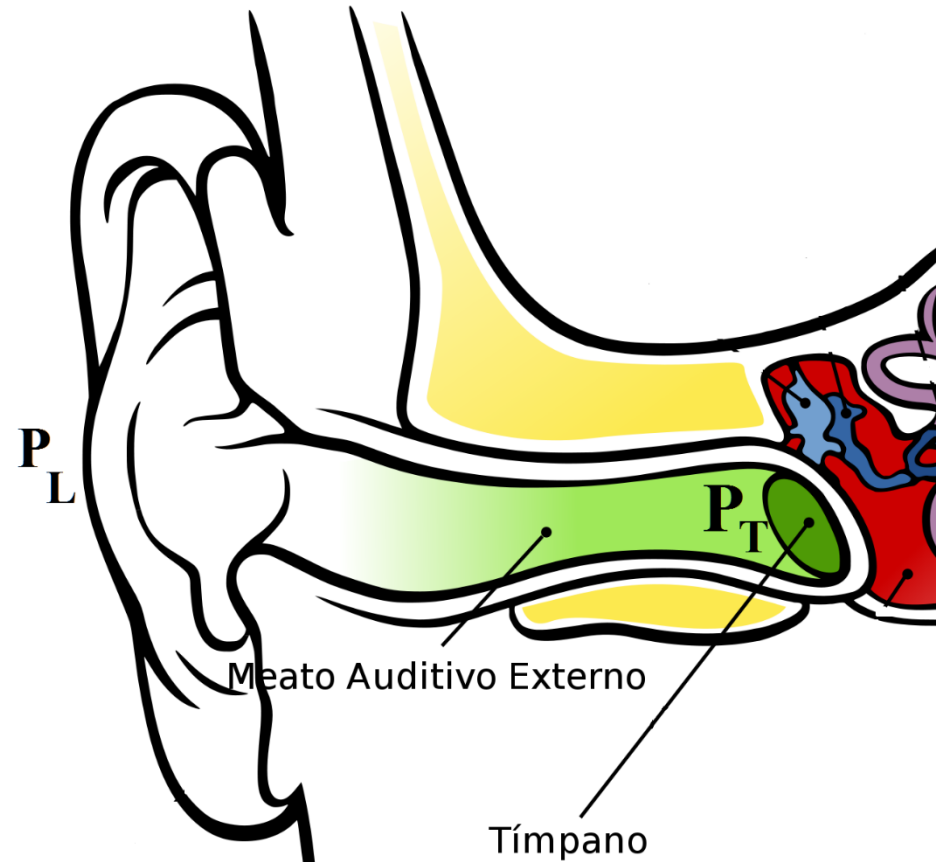


Organização Funcional do Sistema Auditivo Humano

Algumas Patologias e métodos diagnósticos

| Parte do Ouvido | Função | Disfunção | Exame Médico | Otosopia | Audiometria por impedância | Testes com Diapásão | Audiograma Tonal | Emissões Otoacústicas | Testes Supra Níveis | Audiometria do Tronco Encefálico | Audiometria da Voz | Imageamento Clínico |
|----------------------------------|----------------------------------|---|--------------|----------|----------------------------|---------------------|------------------|-----------------------|---------------------|----------------------------------|--------------------|---------------------|
| Ouvido Externo | Filtragem Direcional | Má formação da Orelha | X | | | | | | | | | |
| Ouvido Médio | Casamento de Impedância Acústica | Perda de Condução Auditiva | X | X | | | | | | | | |
| Ouvido Interno | Transdução som-> neuronal | Perda de Audição Coclear | X | X | X | X | X | | | | | |
| Nervo Auditivo Tronco Encefálico | Codificação da Informação | Perda de Audição Neuronal (localização) | X | | | X | X | X | X | X | X | X |
| Córtex Auditivo | Percepção da Voz e complexa | Desordens do sistema central (afasia) | X | | | X | | X | X | X | X | X |

A Orelha Externa



Finalidade:

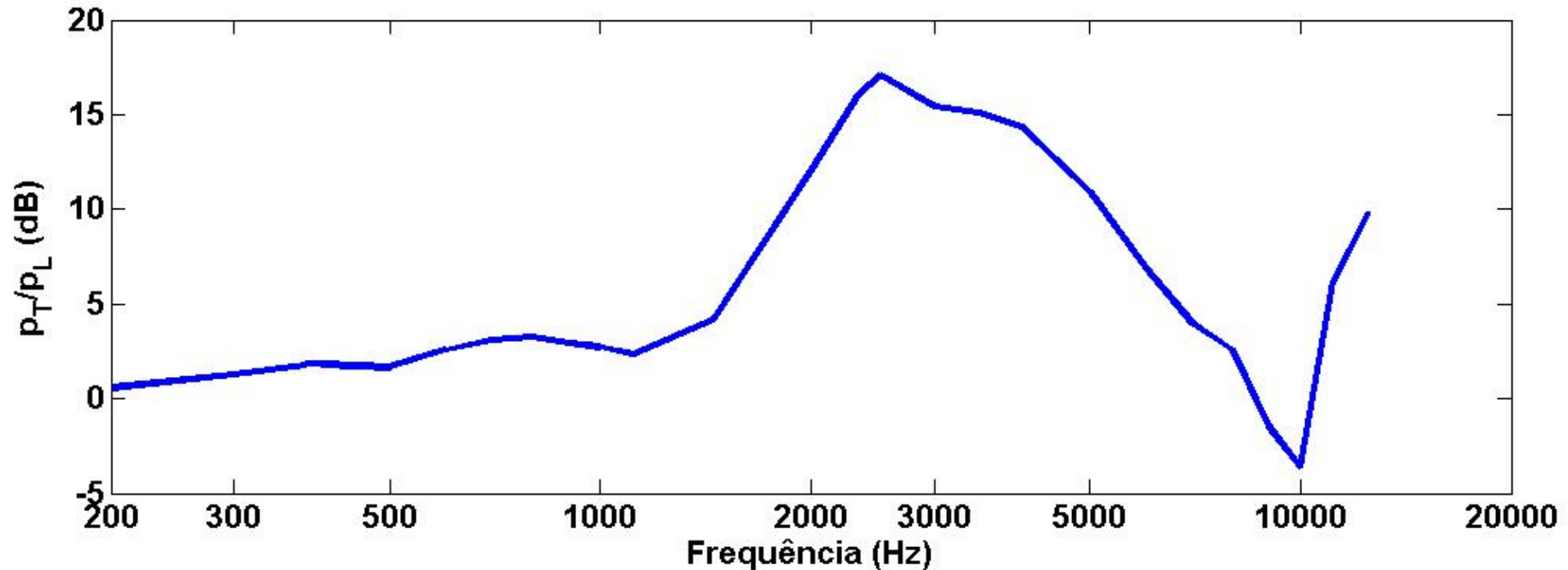
Acoplamento eficiente da pressão sonora externa, em campo Livre (p_L), a pressão no Tímpano (p_T),

Processamentos Importantes na Orelha Externa:

(i) a captação eficiente do som na cabeça (incluindo pelo osso craniano, com ganho bem menor) e

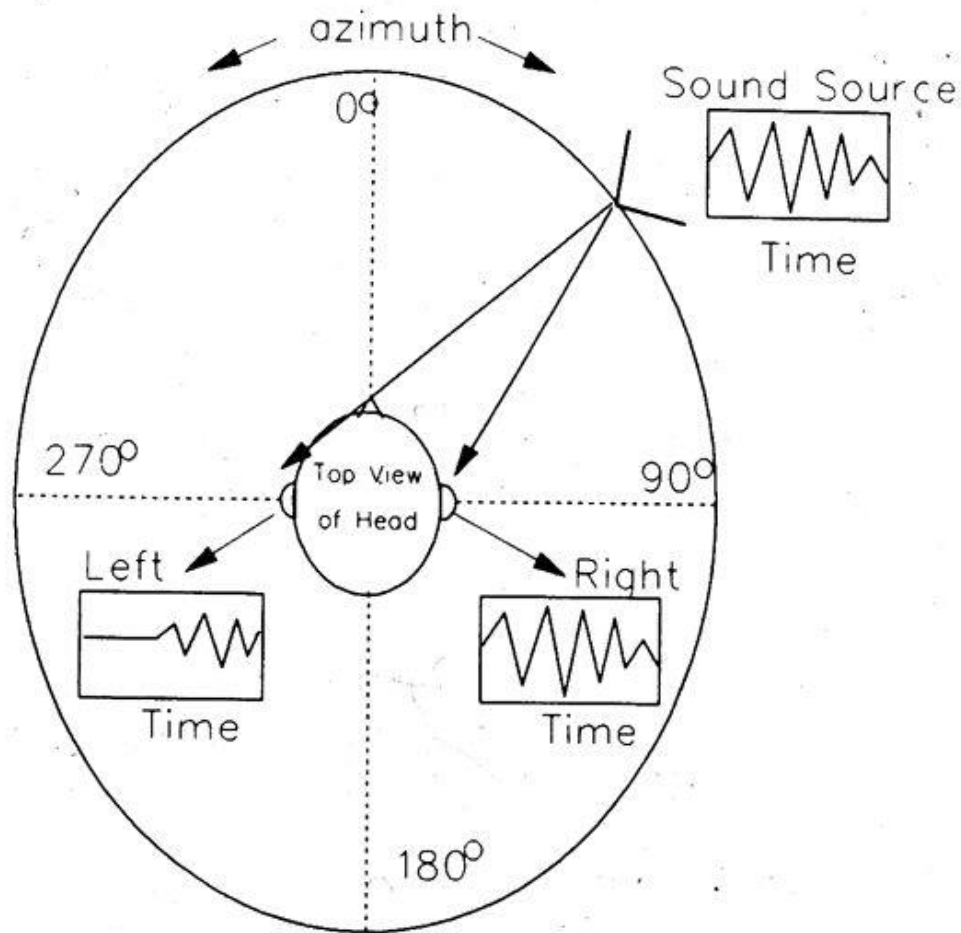
(ii) a Sensibilidade Direcional do par de Orelhas Externas, para a localização das fontes sonoras.

Ganho de Pressão na Orelha Externa



- Maior ganho ocorre entre 2 e 3 kHz
- cai bastante tanto em baixas quanto em altas frequências

Sensibilidade Direcional

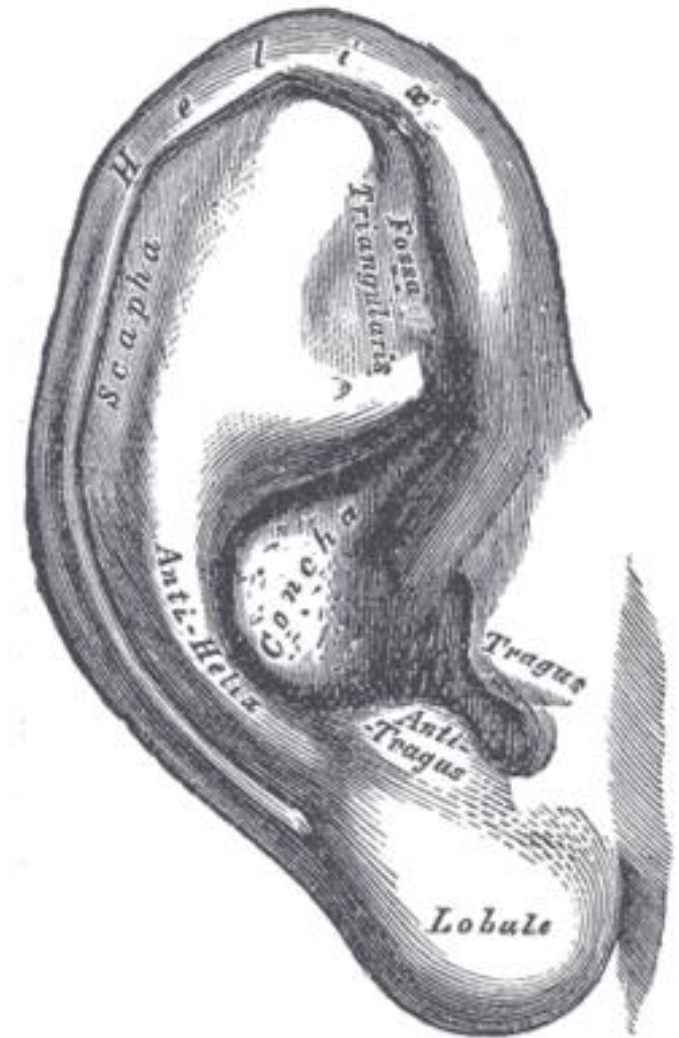


Devido a Diferença no processamento nos semi-lóbulos do cérebro (córtex auditivo), conseguimos a detecção da direção da Fonte Sonora.

Pavilhão Auditivo (“Orelha”)

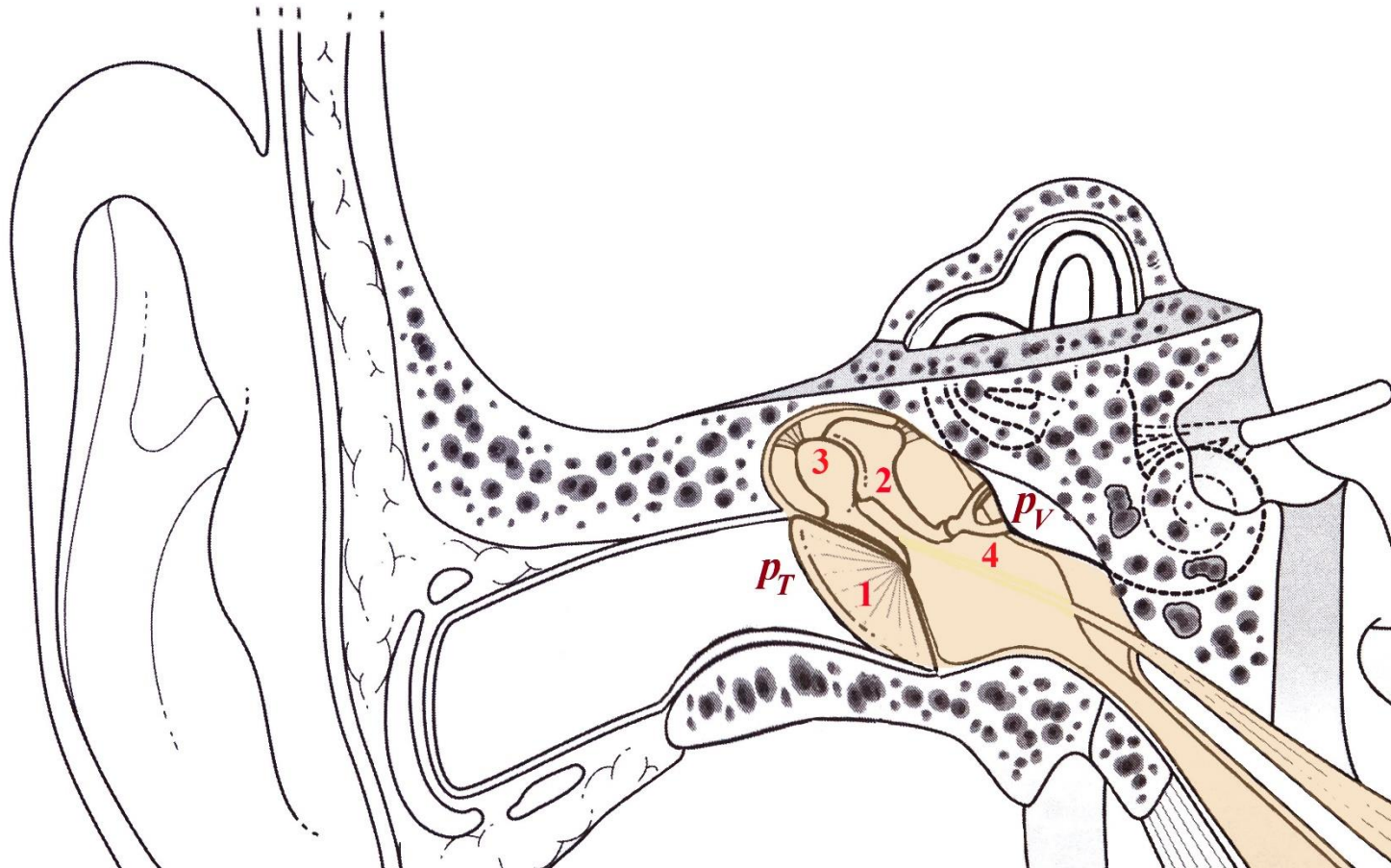
Anatomia com saliências:

- Helix, Anti-helix e reentrâncias:
- fossa triangular, concha



Provoca Ressonâncias e Anti Ressonâncias com o Conduto Auditivo

Orelha Média



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.

Ganho mecânico Orelha Média $\frac{p_V}{p_T} \approx 29 \text{ (15 dB)}$

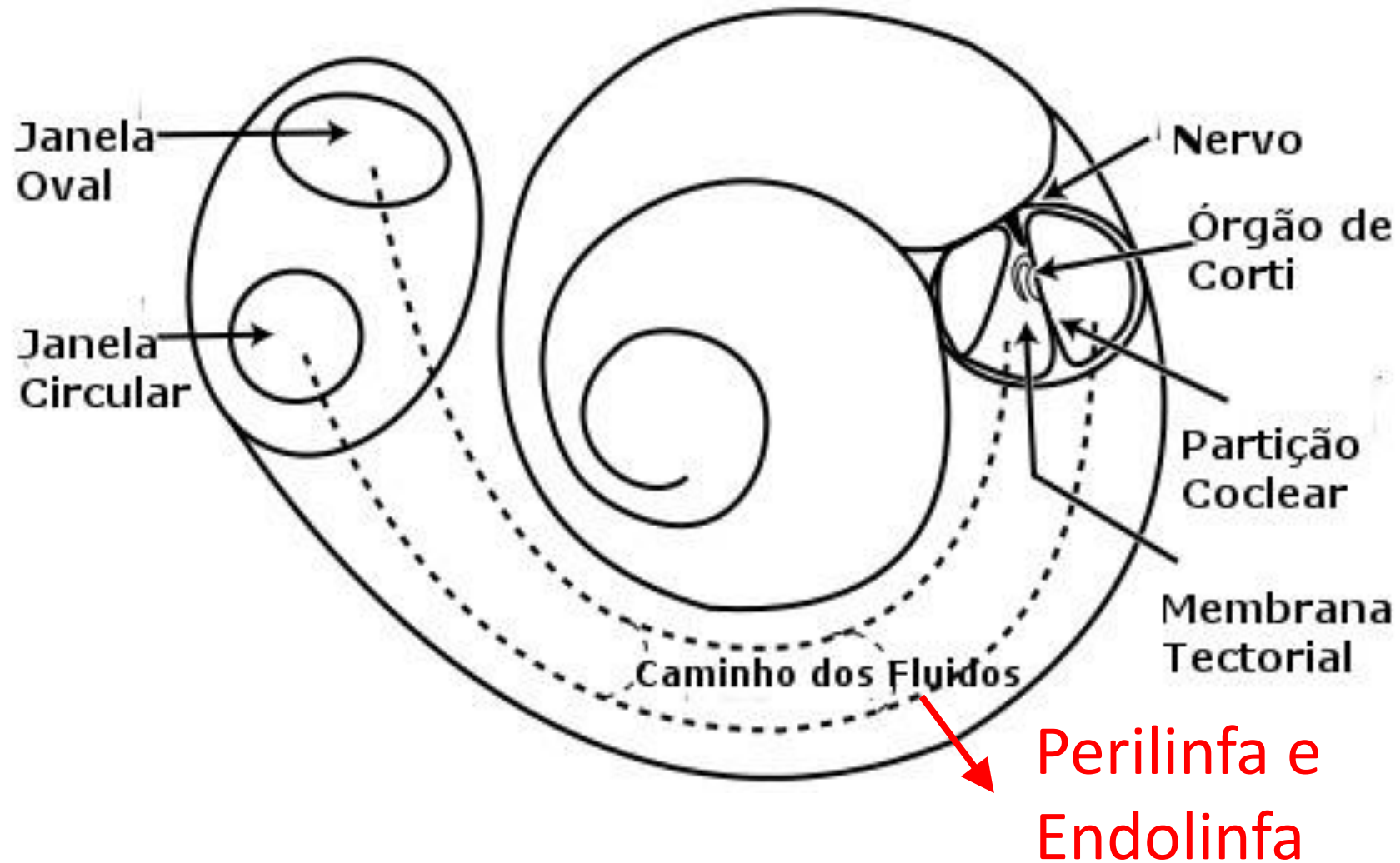
Casamento de Impedâncias Acústicas, entre o Ar e os Fluidos Cocleares (Perilínfa e Endolínfa, ambos NaCl com concentração diferente de K^+)

Analogia Elétrica com o Transformador Balun para Casamento de Impedância de Antenas

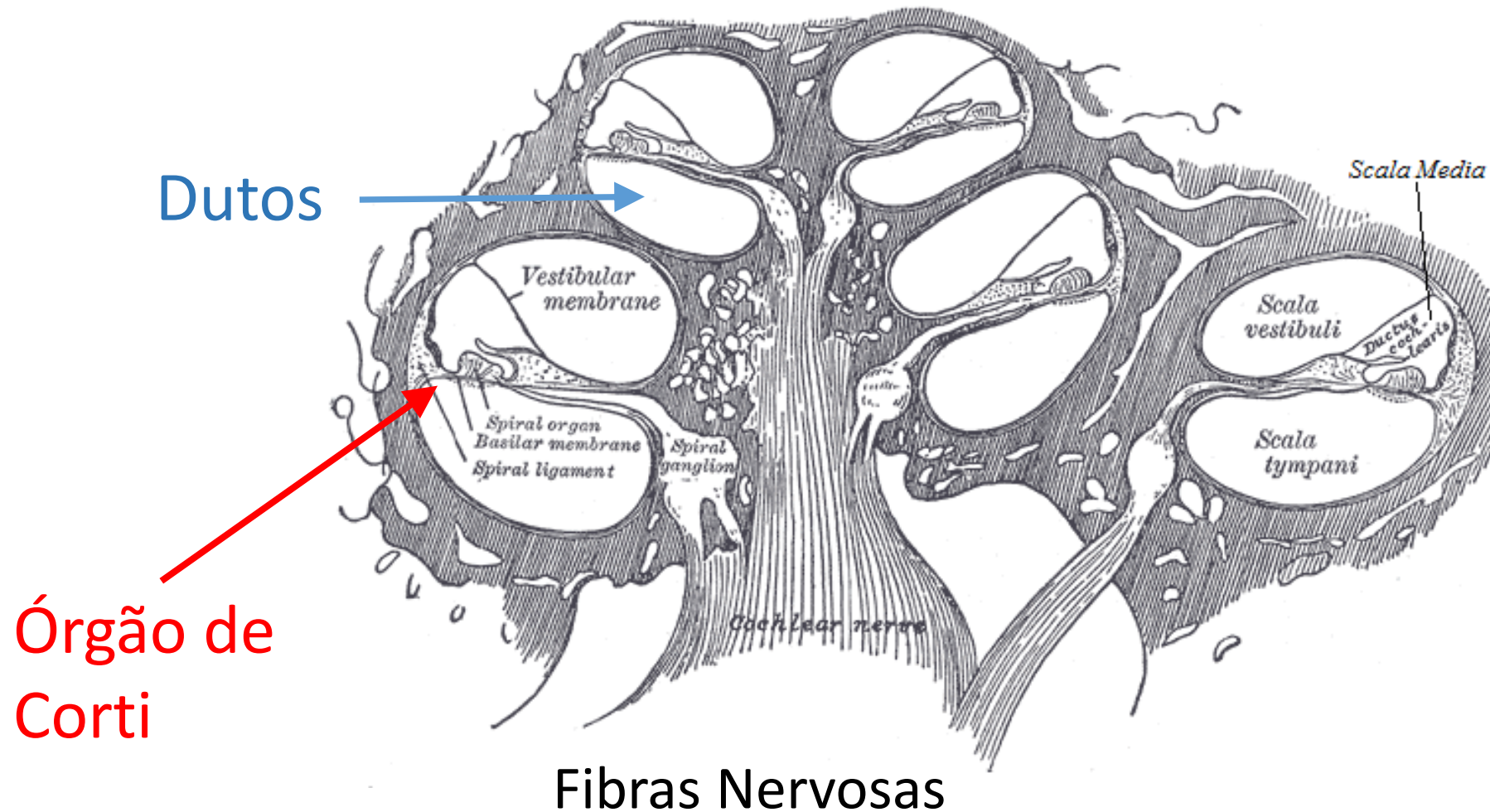
300 para 75 (ou 50) Ω



Orelha Interna: Cóclea

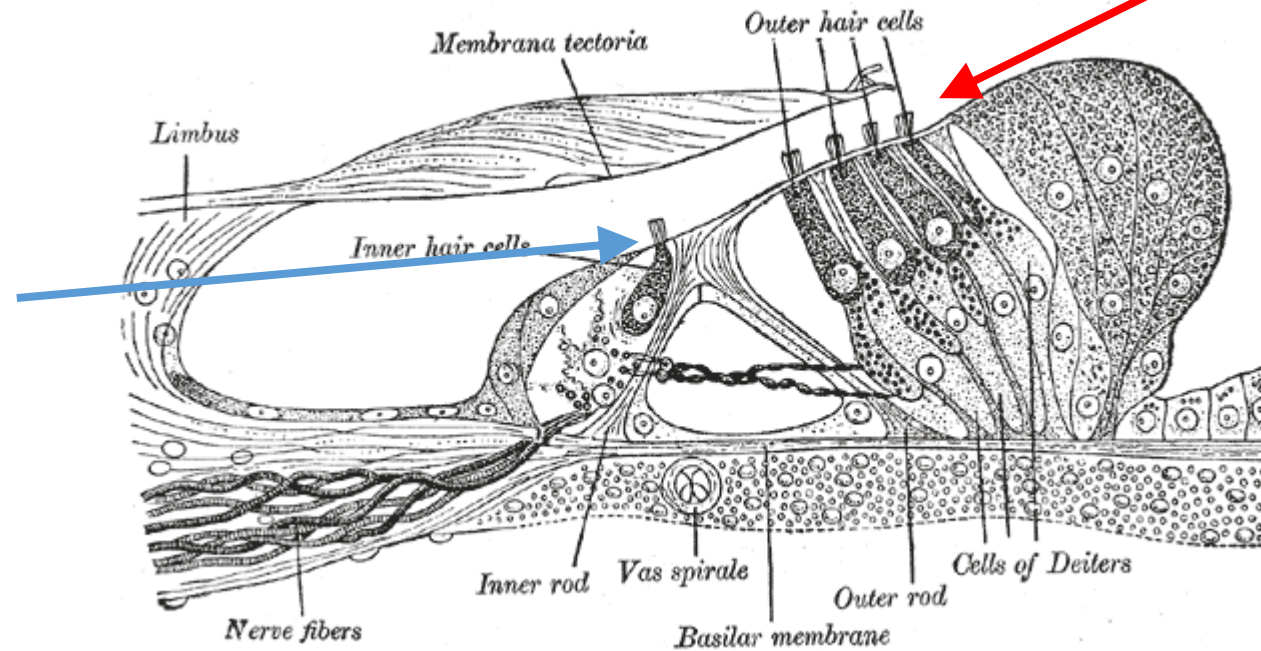


Cóclea: Corte Transversal em detalhe



Cóclea: Órgão de Corti

Células
Ciliadas
Internas



Células
Ciliadas
Externas

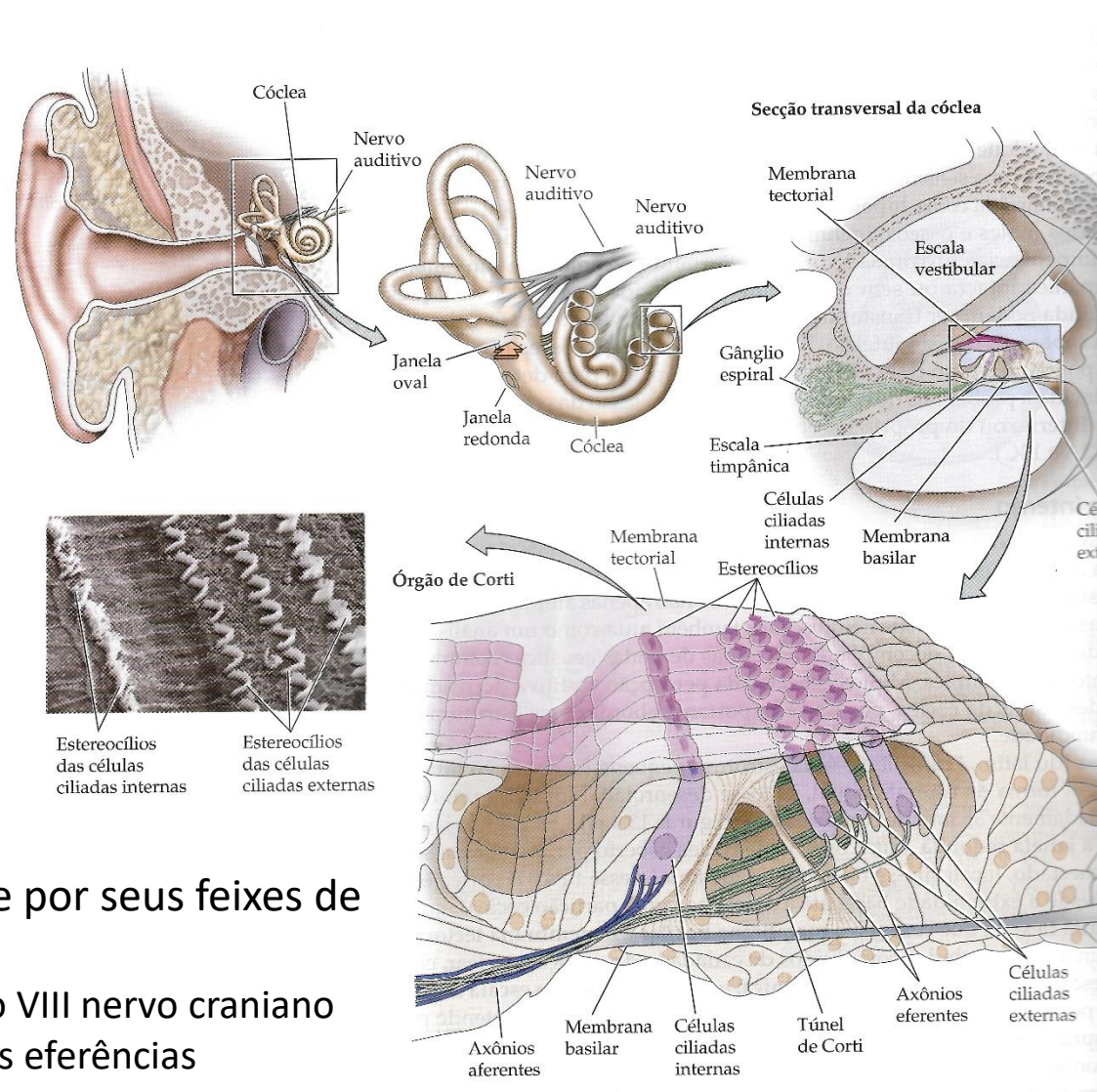
Visão Geral da Cóclea

1) O estribo transfere a força da membrana timpânica ao longo dos outros ossículos para a janela oval

4) Eletromiografia de varredura mostrando estruturas abaixo da membrana tectorial

5) Células ciliadas recebem este nome por seus feixes de esterecílios:

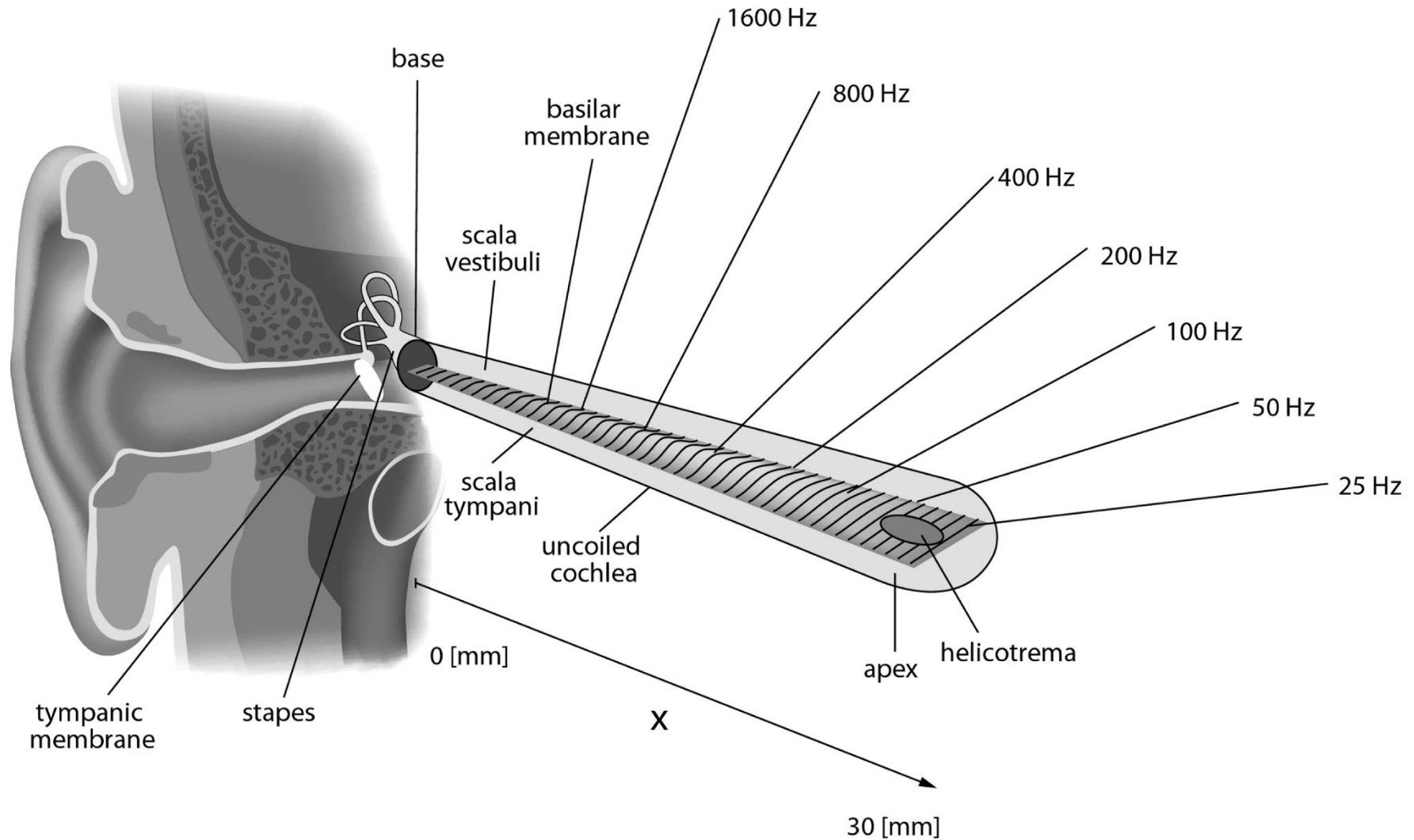
- Células internas recebem aferências do VIII nervo craniano
- Células externas recebem a maioria das eferências



2) Em secção transversal temos a escala média, entre as escalas vestibular e timpânica

3) Uma ampliação do órgão de Corti mostra as células ciliadas entre a membrana basilar e a tectorial (transparente)

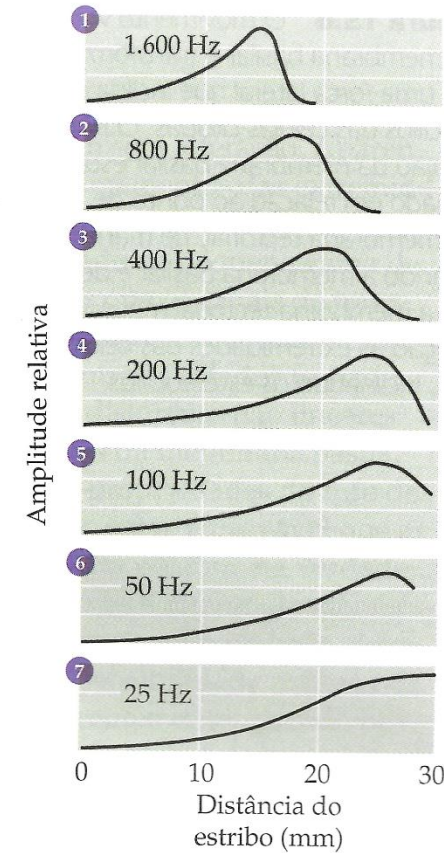
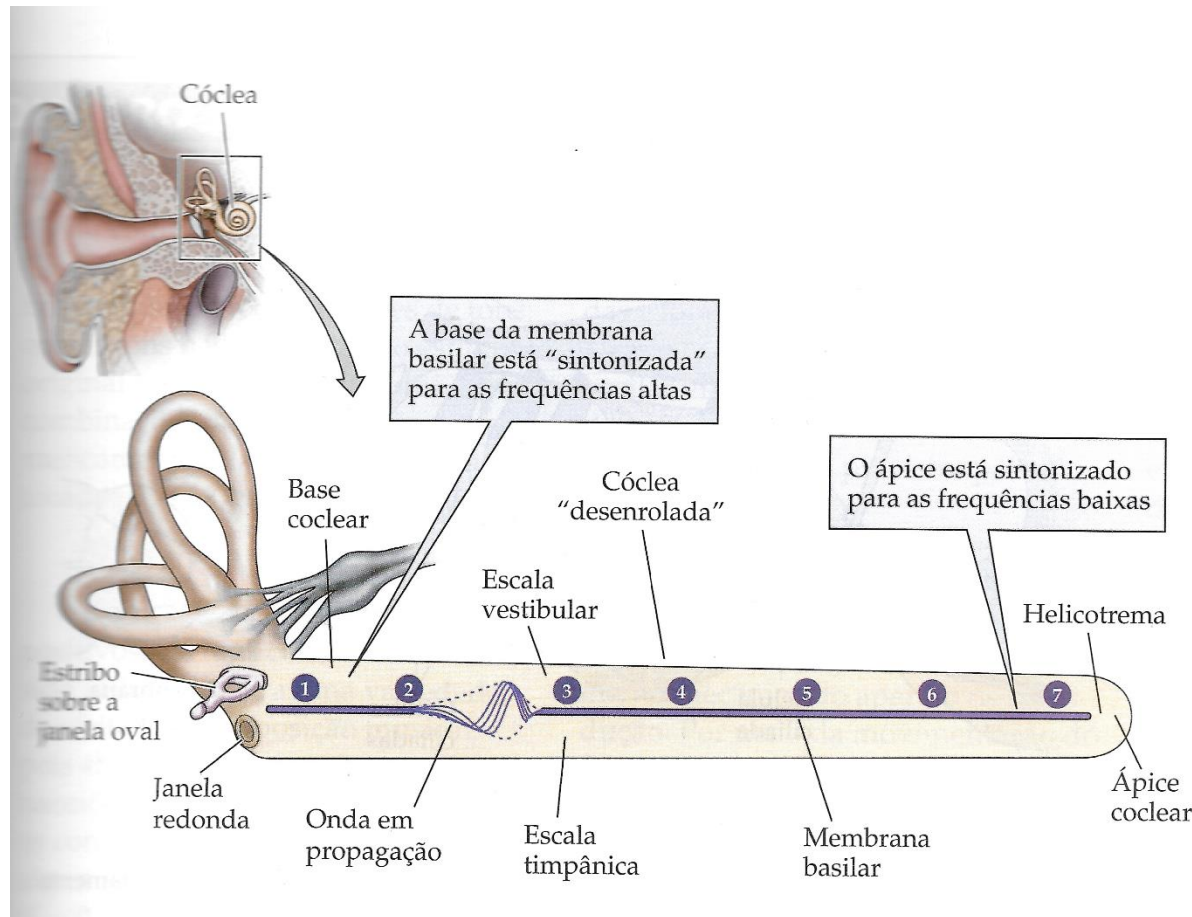
Membrana Basilar



Animação



Propagação das Ondas na Cóclea

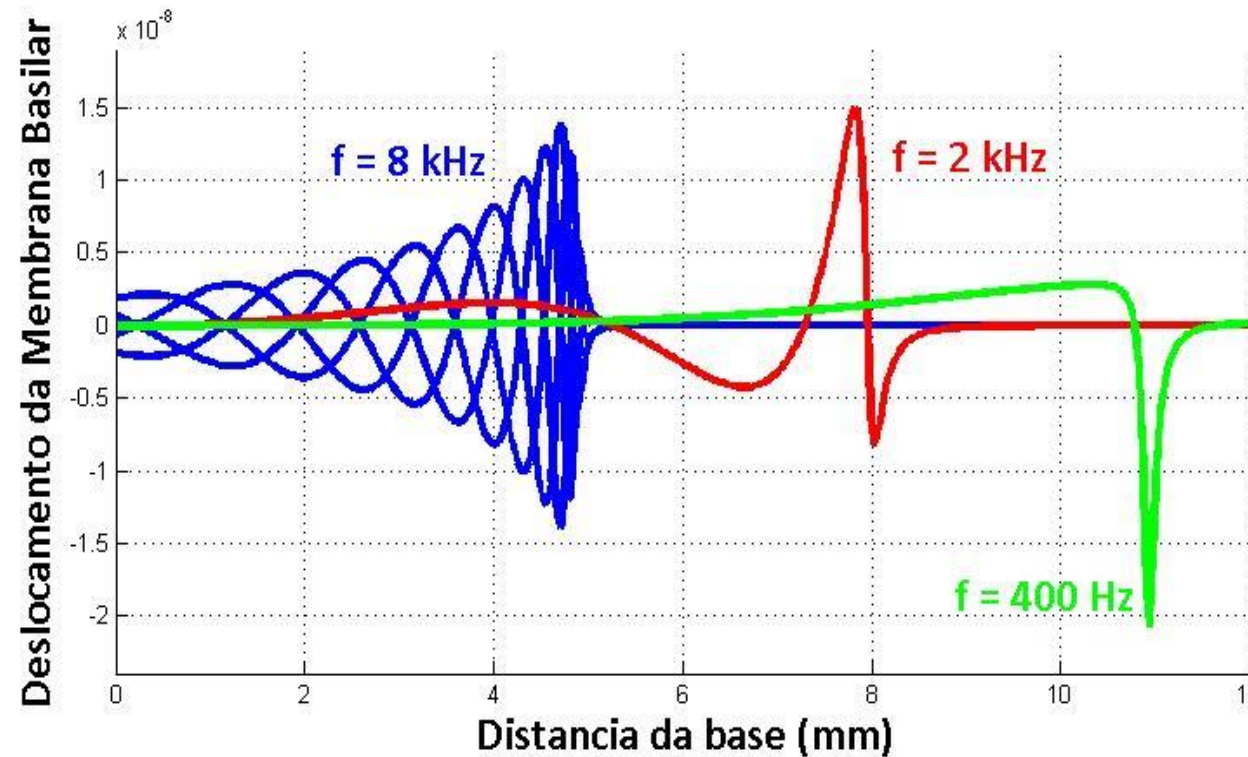


Pontos que respondem a frequências altas estão na base da membrana

MAPEAMENTO TOPOGRÁFICO DA FREQUÊNCIA OU TONOTOPIA

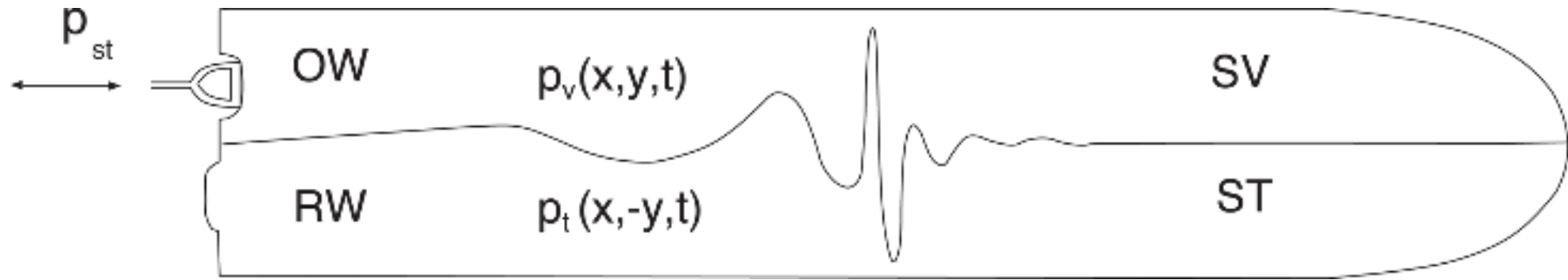
Pontos que respondem a frequências baixas estão na base da membrana

Deslocamento na Membrana Basilar



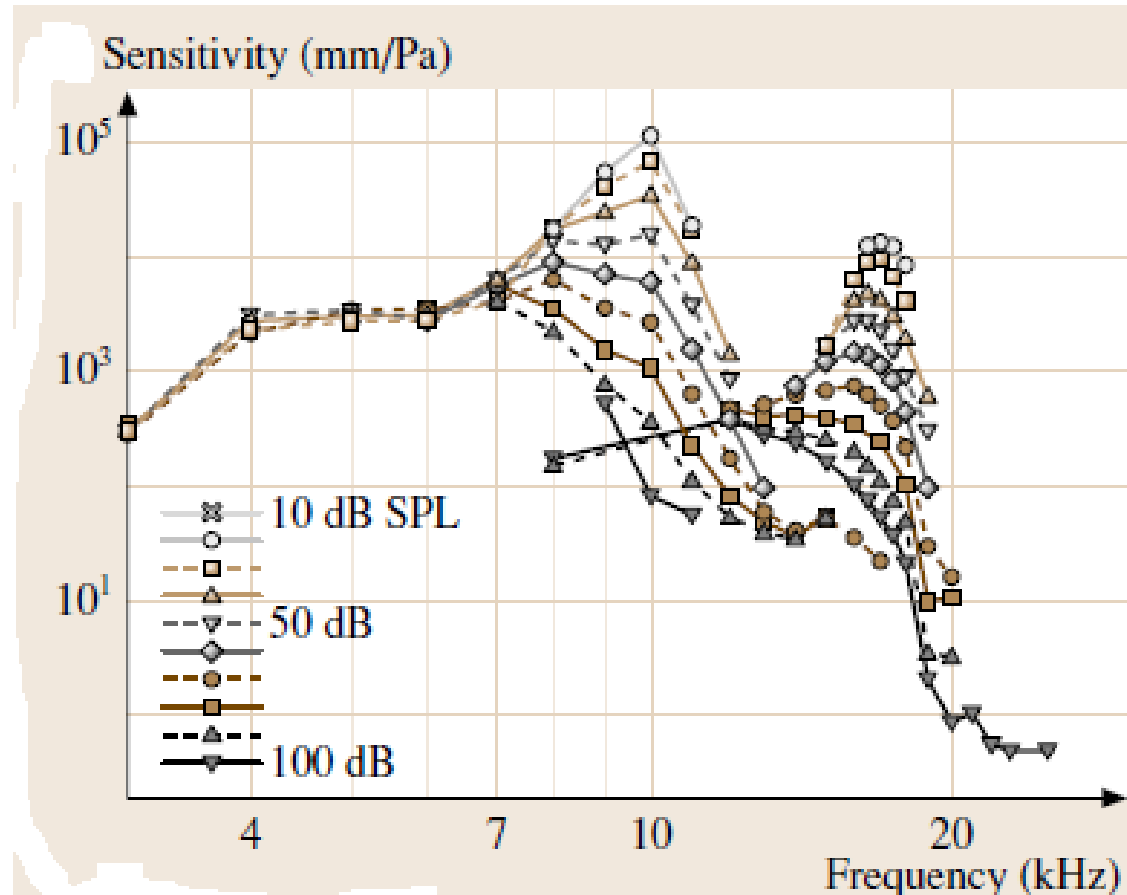
A frequência do sinal sonoro acarreta uma vibração diferente dependendo da posição na Membrana Basilar (Tonotopia)

Onda Sonora na Membrana Basilar



Vibração sonora na OW (janela Oval) e na RW (janela redonda), indicando ondas mecânicas no sentido $y+$ (positivas) e $y-$ (negativas), justificando a existência de dois dutos (scala), o vestibular e o timpânico.

Variação da Sensibilidade (Ganho) na Membrana Basilar com a Intensidade Sonora



Duas ondas sonoras de frequências diferentes, com variação de 10 dB SPL entre 10 e 100 dB SPL

Mais “picudo” quanto menor a pressão sonora, indicando um $Q/\Delta f$ constante

Nervos Auditivos

- Célula Ciliada (*inner* ou *outer hair cell*)

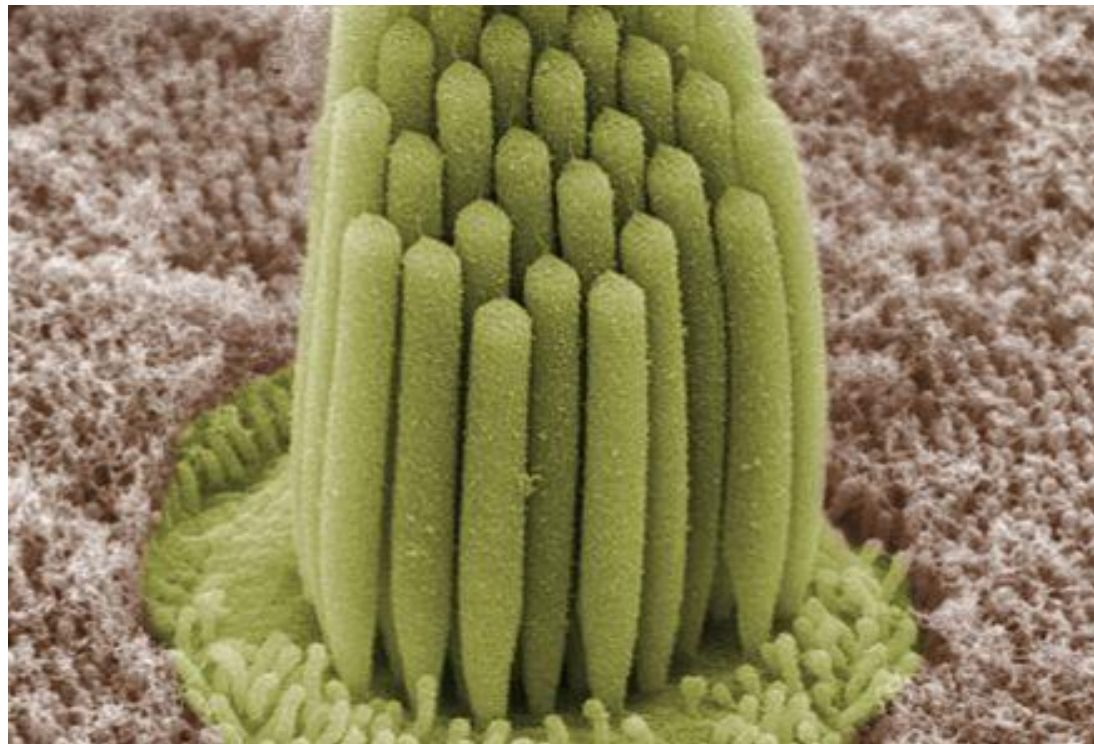


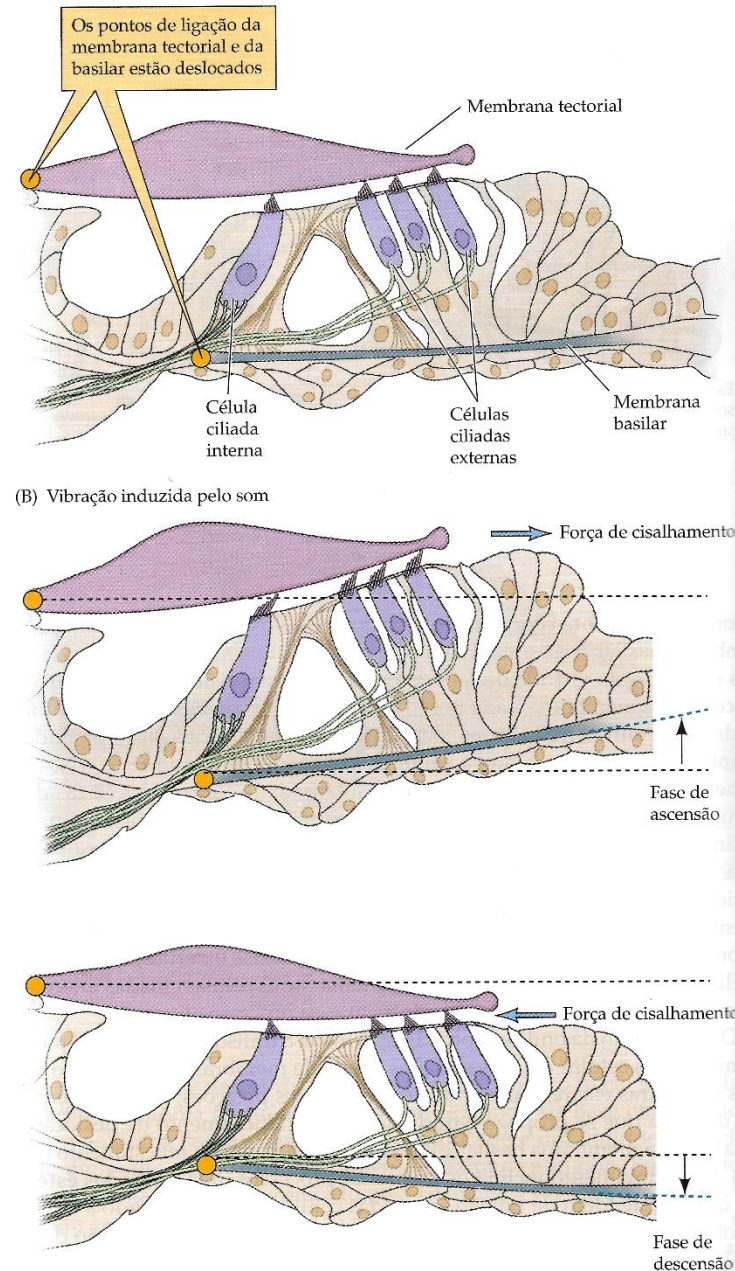
Imagem de
um MEV

1 μ m
↔

O movimento vertical da membrana basilar é transformado em uma força lateral que inclina os estereocílios das células ciliadas.

O ponto de ligação da membrana basilar está desalinhado com relação ao da membrana tectorial

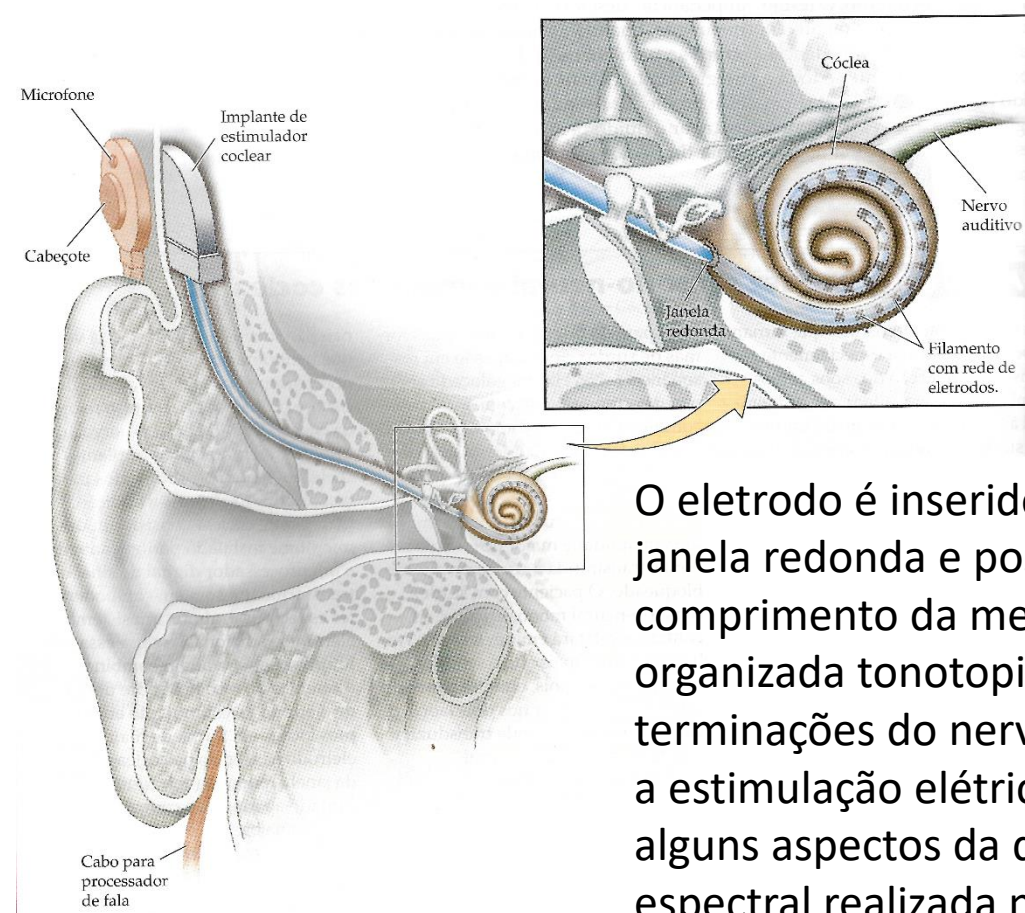
Quando a membrana basilar é deslocada pela passagem da onda sonora, a membrana tectorial move-se em relação às extremidades das células ciliadas, inclinando os estereocílios



Movimento Vertical nas Membranas tectorial e basilar

Implante Coclear

Consiste num microfone instalado perifericamente e um processador digital de sinais que faça análise espectral do som, e um sistema microeletrônico que usa as informações espectrais para ativar combinações de contatos sobre um tipo de eletrodo de estimulação em forma de filamento.

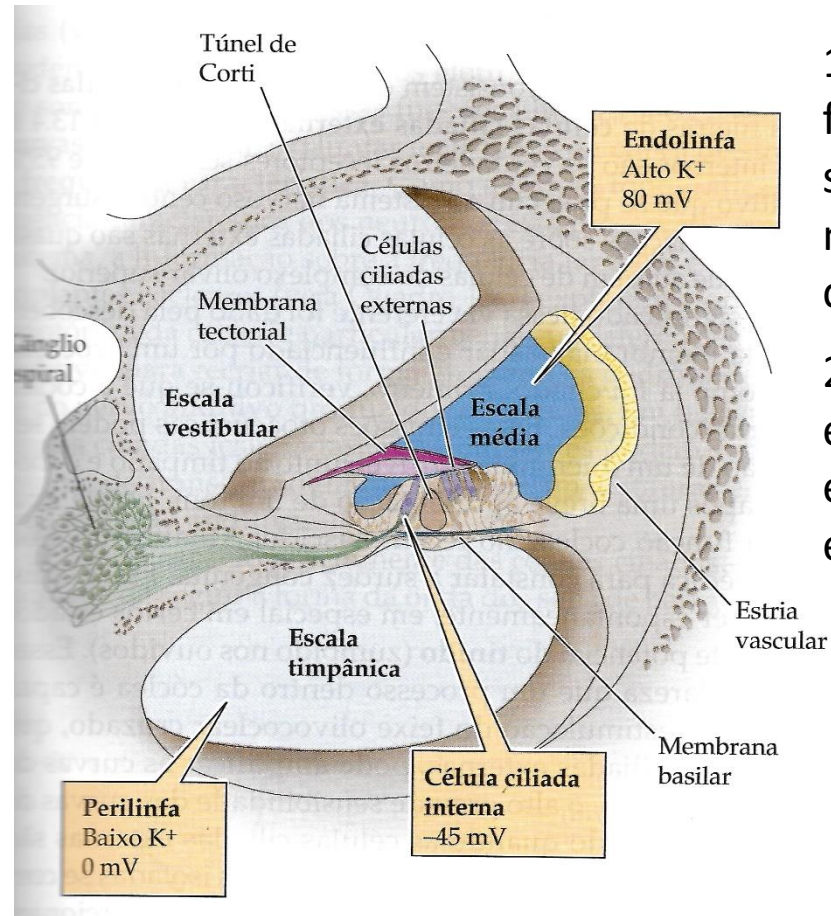


O eletrodo é inserido na cóclea através da janela redonda e posicionado ao longo do comprimento da membrana basilar, organizada tonotopicamente, e das terminações do nervo auditivo, permitindo a estimulação elétrica do nervo, simulando alguns aspectos da decomposição espectral realizada naturalmente na cóclea

Despolarização, Hiperpolarização e Repolarização das Células Ciliadas

- São mediadas por K^+
- Os estereocílios das células ciliadas estendem-se para dentro da endolinfa, que possui alta concentração de K^+ e um potencial elétrico de 80mV em relação à perilinfa

3) O potencial de repouso negativo da célula ciliada e a baixa concentração de K^+ na perilinfa extracelular provoca o efluxo de K^+ (repolarização)



1) Despolarização: quando o feixe de estereocílios desloca-se na direção do estereocílio maior, pois mais K^+ entra na célula

2) Hiperpolarização: quando o estereocílio maior desloca-se em direção ao menor, K^+ não entra na célula

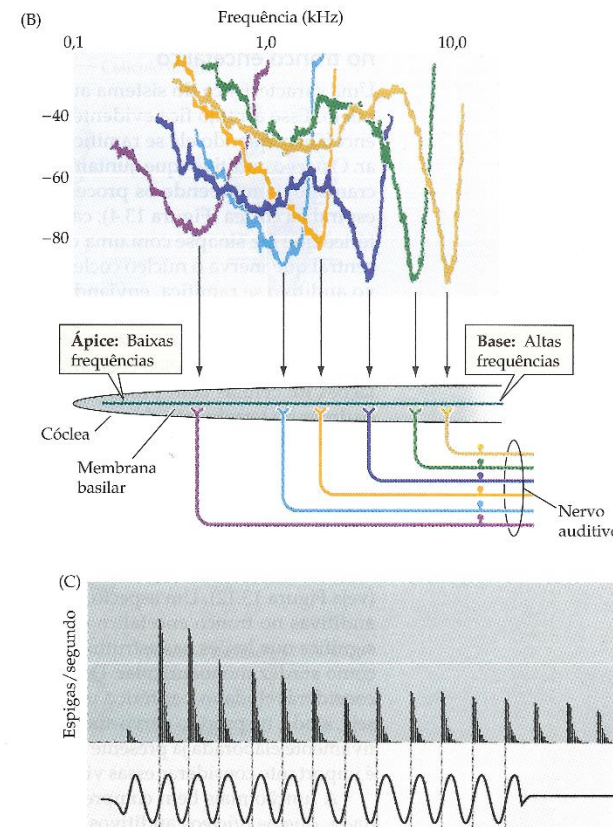
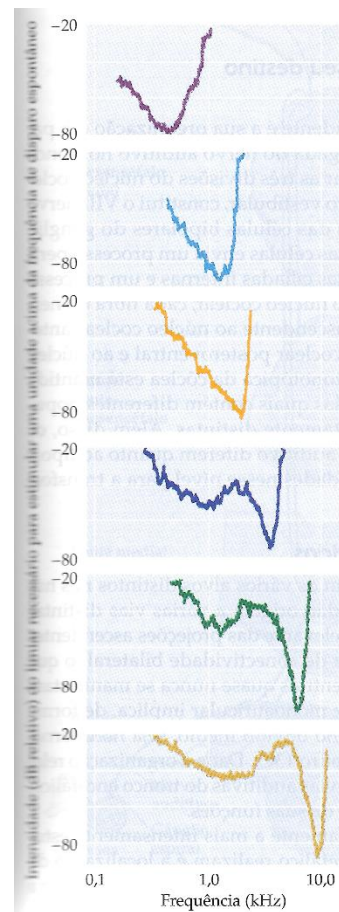
Estas bases iônicas geram “senóides” com a passagem do som

- A célula ciliada possui um potencial de repouso entre -45mV e -60mV

Respostas dos Axiônios

Curvas de sintonia de frequência de seis axônios diferentes:

- Cada curva representa o nível mínimo de som necessário para aumentar a frequência de disparo da fibra, acima do nível de disparo espontâneo
- O ponto mais baixo no gráfico é a intensidade de som mais fraca à qual o neurônio responde.
- A frequência neste ponto é chamada de frequência característica (f_c).

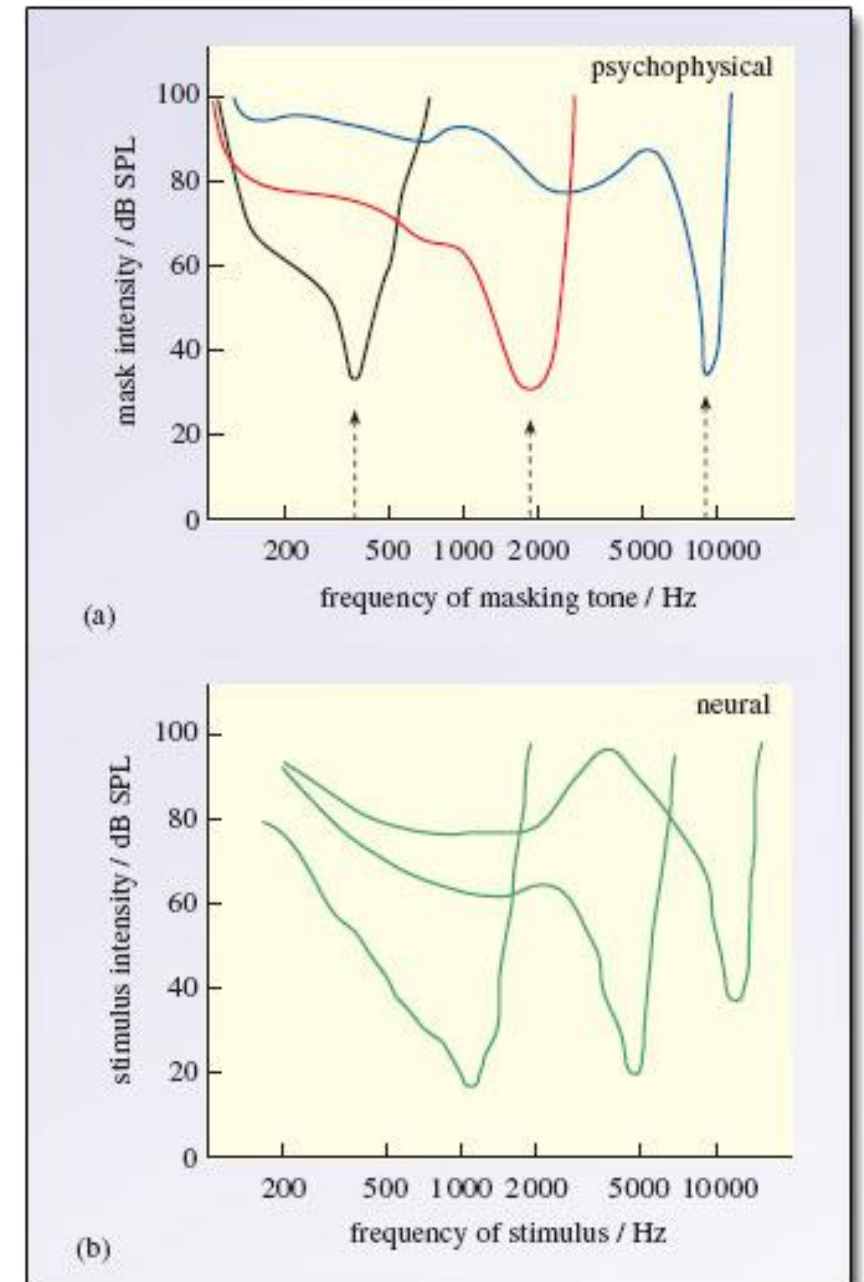


As curvas de sintonia de frequências dos axônios do nervo auditivo estão sobrepostas e alinhadas com seus pontos de inervação relacionados aproximados ao longo da membrana basilar

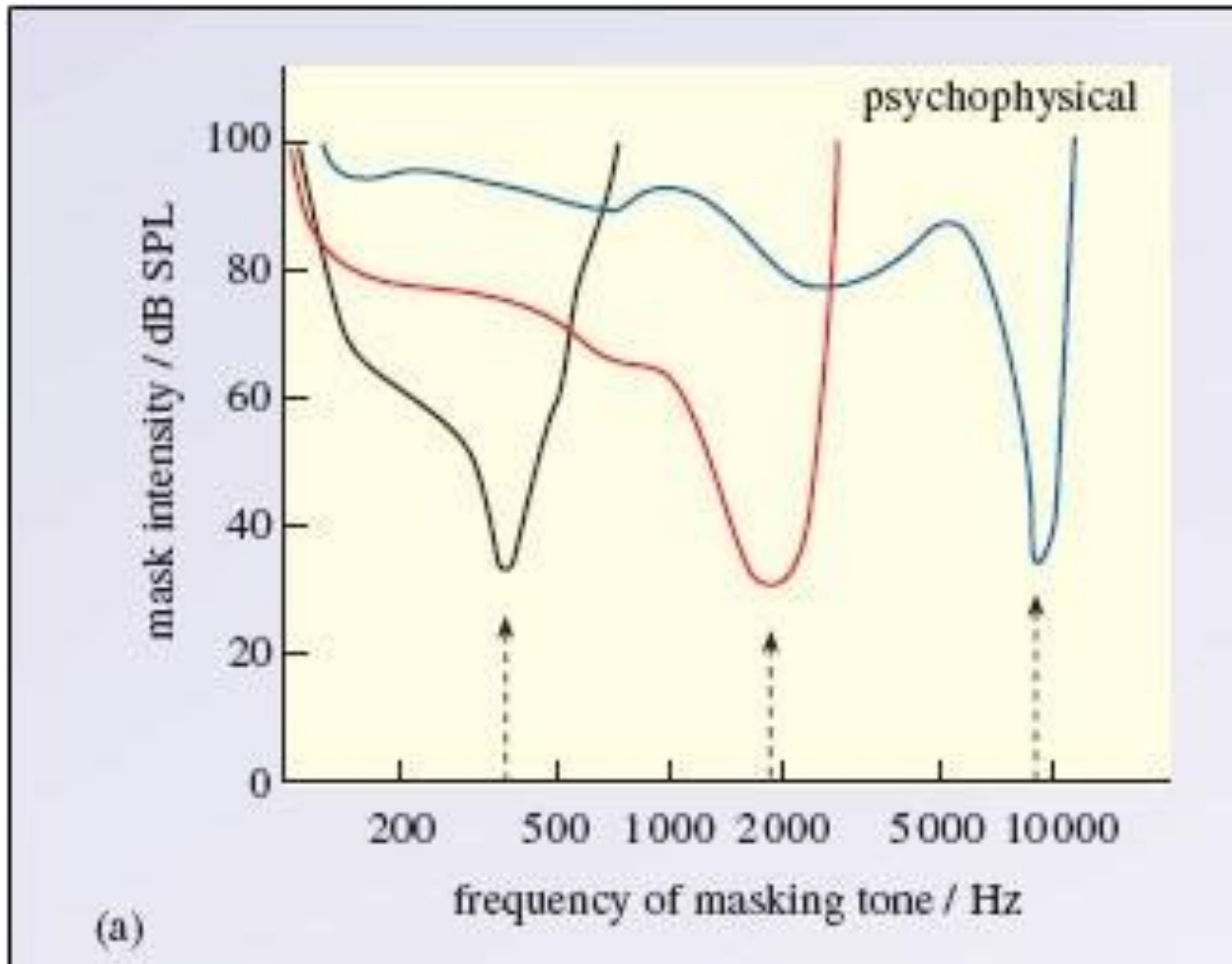
Padrões de resposta temporal de um axônio de baixa frequência do nervo auditivo. Os histogramas mostram a resposta ao estímulo, que era um pulso de senoide de 50ms e 260Hz.

Semelhança entre as Curvas
(a) Psicoperceptivas
e de
(b) Sintonia Neuronal

As **células ciliares internas** respondem às frequências diferentes e as **ciliares externas** possibilitam a ocorrência destas respostas nas regiões diferentes da membrana basilar.

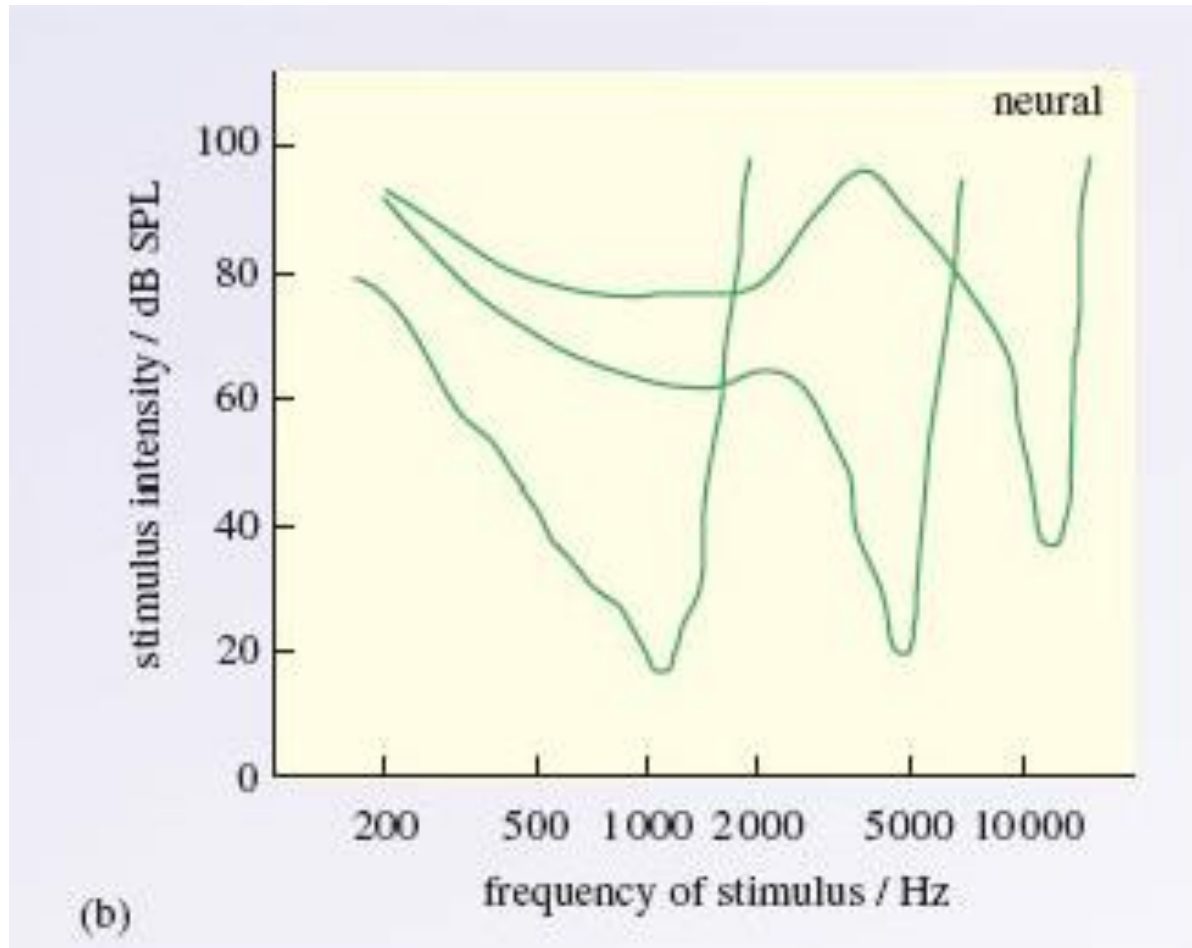


Curvas Psicoperceptivas: exemplo para 3 BFs



- Inicia-se com uma melhor frequência (BF, *Best Frequency*) em 10 dB SPL (setas) tracejadas
- Varredura centrada na BF para obter a mesma sensibilidade, pois ela é diferente para cada frequência.

Correspondência com Respostas Neurais



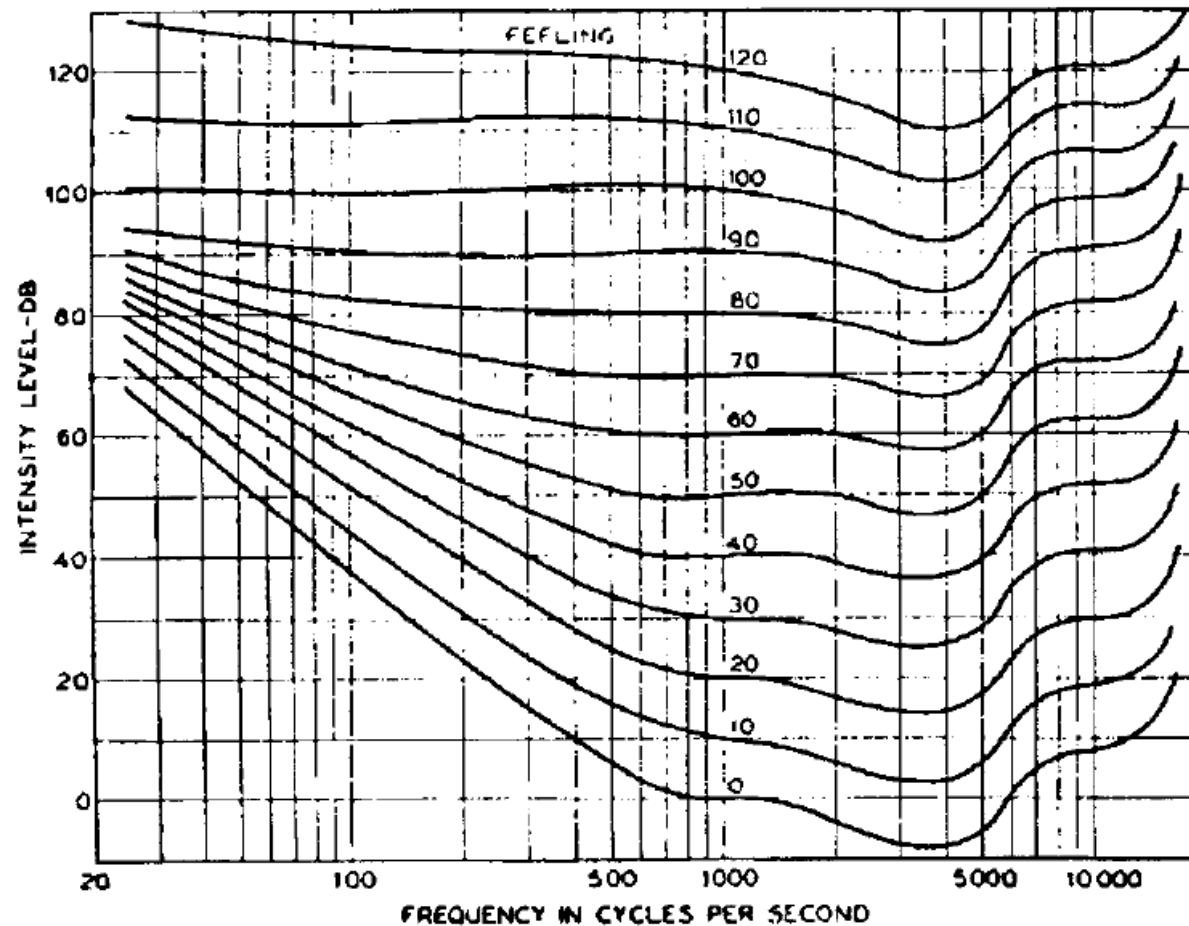
Medição de Taxas de Disparos nas Fibras Neurais Auditivas, para os três tons BFs, indicando variação de forma na resposta similar às curvas perceptivas.

Modelagem Sugerida:

- Motivação para Análise em Tempo-Frequência por banco de filtros de aspecto “Quase” Triangular do Sistema Auditivo, com fator $Q/\Delta f$ constante
- Não linearidade na sensibilidade da percepção de Intensidade Sonora
- Não linearidade na escala de percepção em frequência
- Modelo di-log (decibéis na intensidade e log na frequência) com índice de mérito constante.

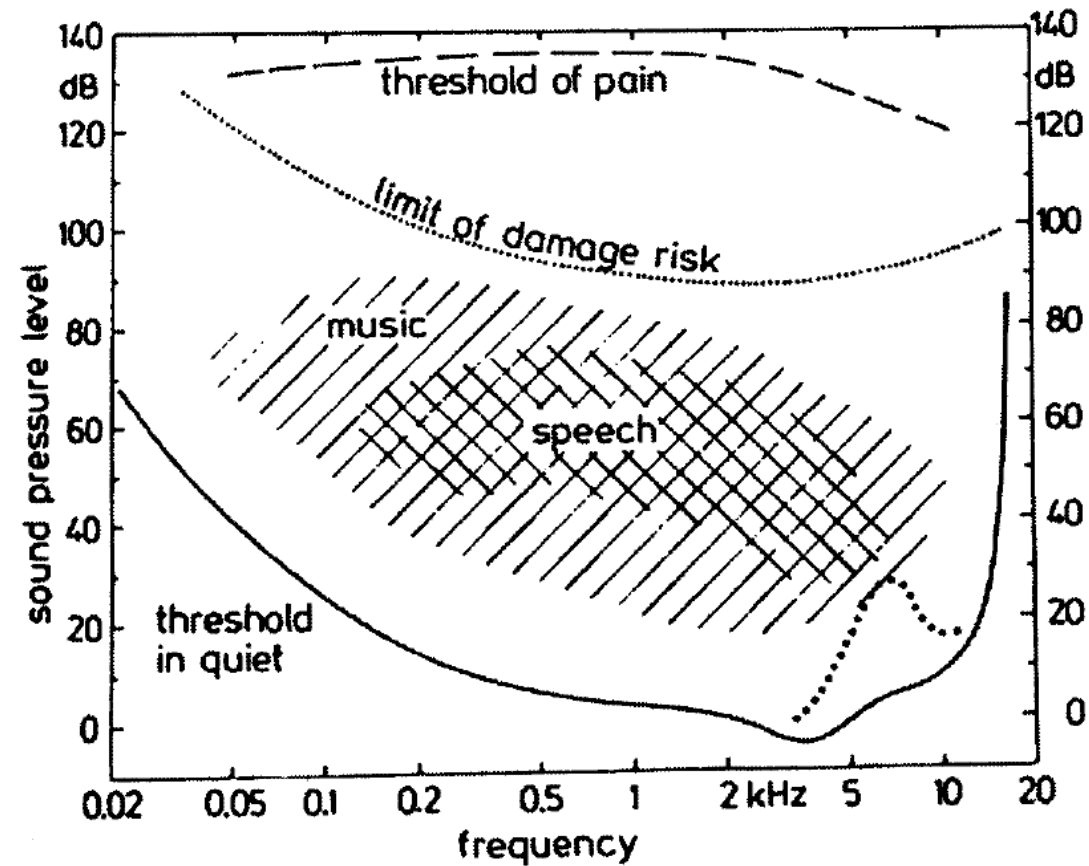
Curvas de Igual – “Loudness”

Percepção de nível sonoro varia de acordo com a intensidade sonora e com a frequência



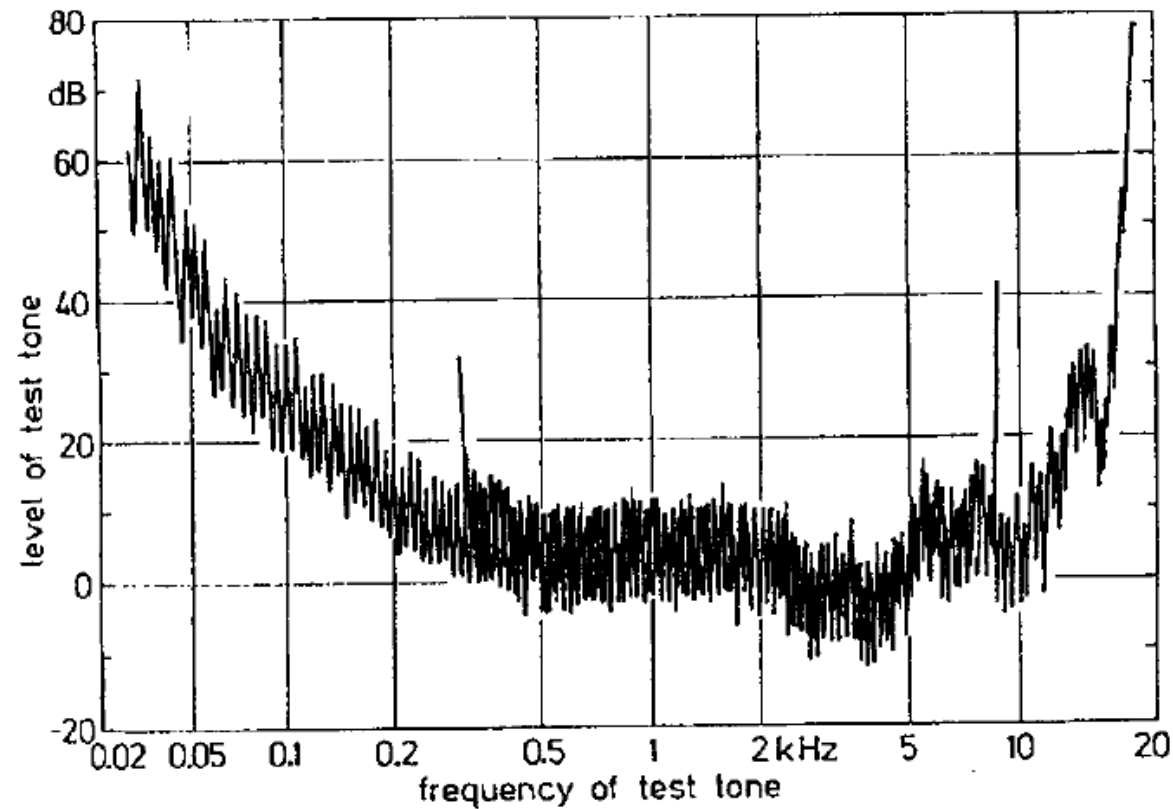
Fletcher &
Munson 1933

Limites e Limiares



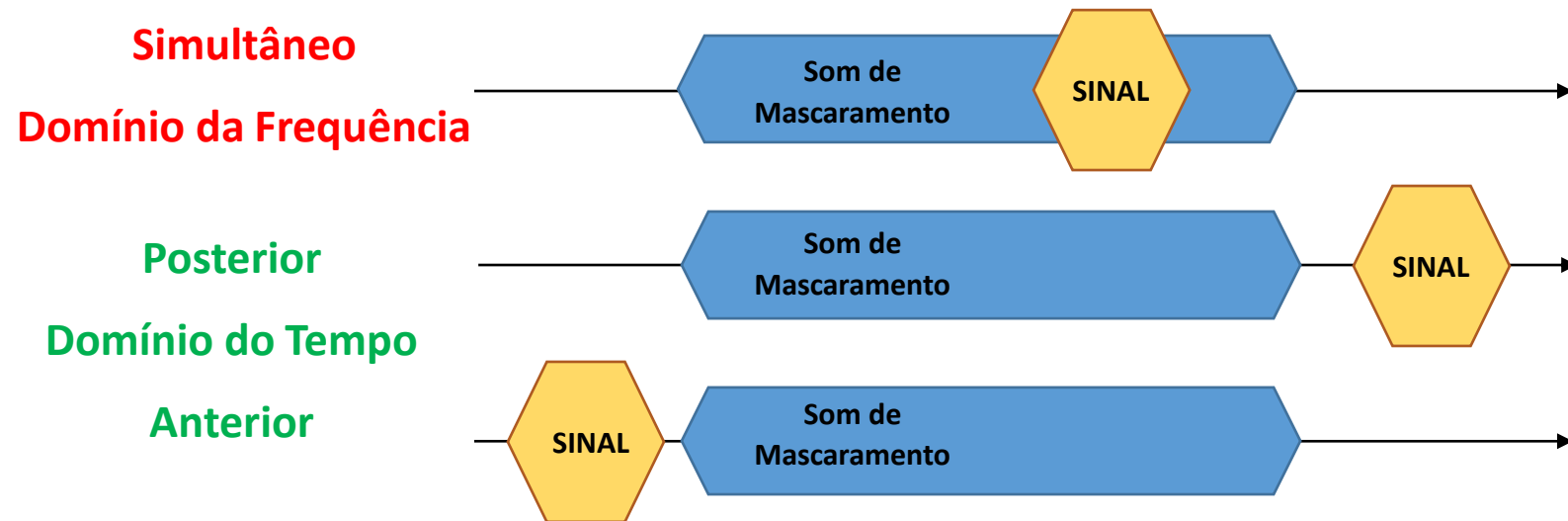
Limiar Auditivo Médio

Menor nível
sonoro percebido
em cada
frequência



Zwicker & Fastl
1990

Tipos de Mascaramento



Exercícios 5. Questões para entrega.

- 1) Para um sinal padrão com pressão sonora p_L padrão de 10mPa incidente na Orelha, ou seja, aproximadamente 54 dB SPL:
 - a) Calcule a pressão sonora no tímpano em dB SPL e em pascais para sinal padrão harmônico (senoidal) de frequências 500 Hz, 2600 Hz e 10 kHz;
 - b) Se desejarmos a pressão no tímpano com pelo menos 64 dB SPL, qual a faixa de frequências devemos usar para varredura (“sweep”) do sinal padrão?
- 2) Quais são e qual a função dos “ossos” na orelha média?
- 3) O que é o efeito tonotópico na membrana basilar da orelha interna?
- 4) Como ocorre a conversão acústico-elétrica nas células ciliadas?
- 5) Explique quais são e como ocorrem os mascaramentos auditivos.
- 6) Qual o mecanismo de identificação da localização da fonte sonora pelo sistema auditivo?
- 7) Justifique o modelo de filtros triangulares com fator $Q/\Delta f$ constante para o sistema auditivo humano.