

# Percepção Auditiva

PTC3547 – Codificação e Transmissão Multimídia

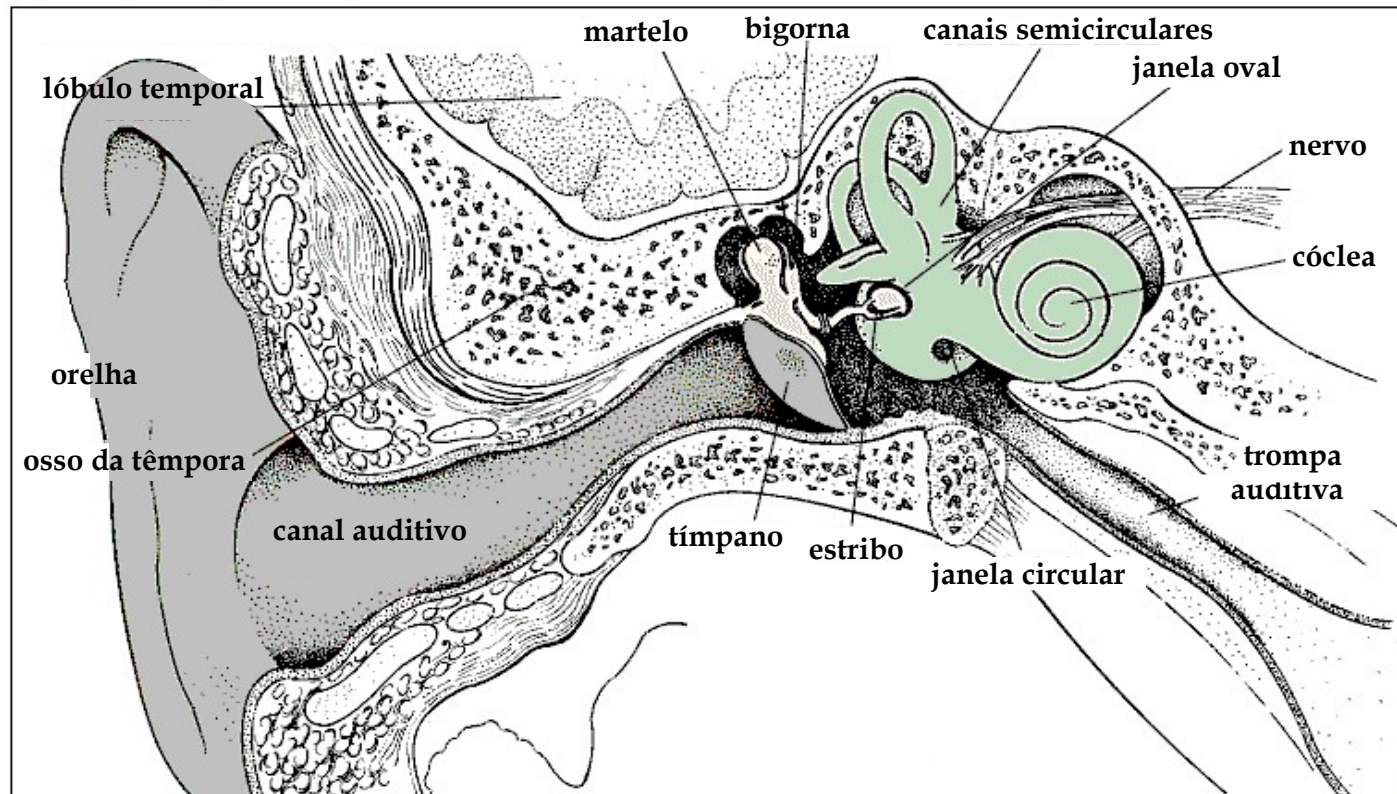
Guido Stolfi – 5/2025



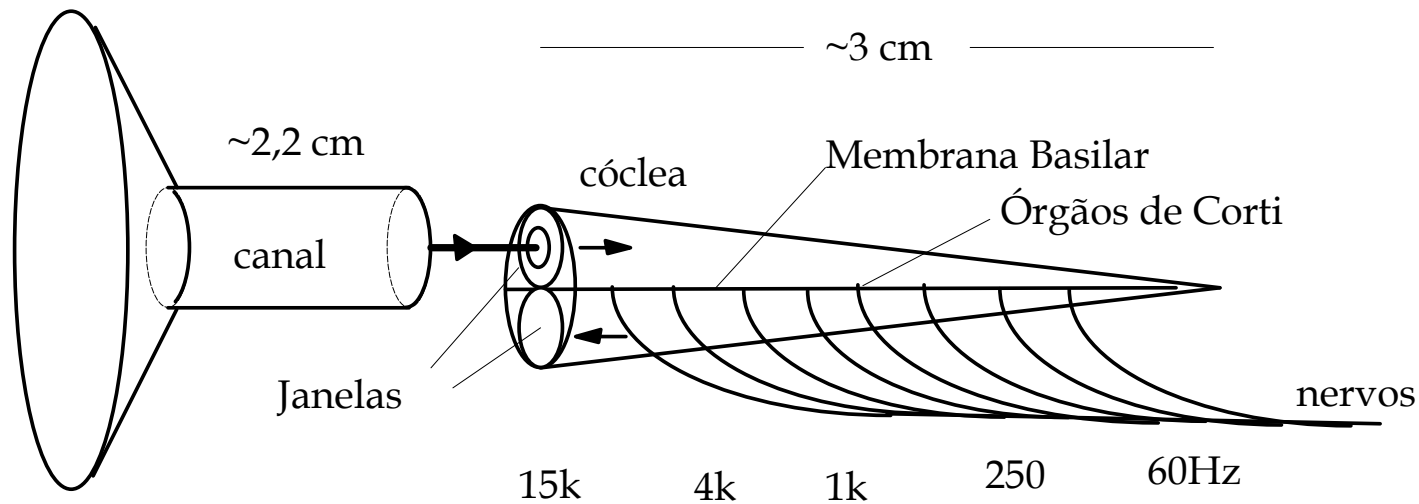
- Fisiologia do Ouvido Humano
- Acústica Física
- Mascaramento
- Voz Humana e Vocoder
- Modelamento de Sistemas Dinâmicos
- Questões Polêmicas

# Fisiologia do Ouvido Humano

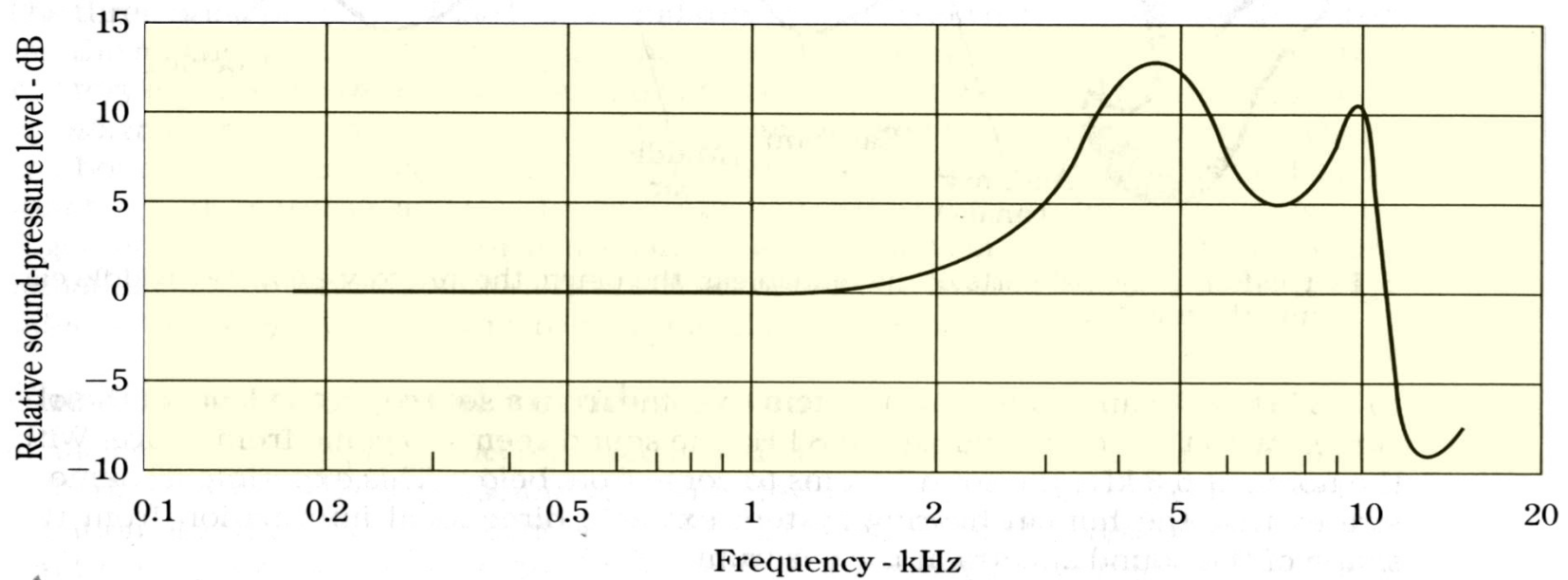
# Estrutura do Ouvido Humano



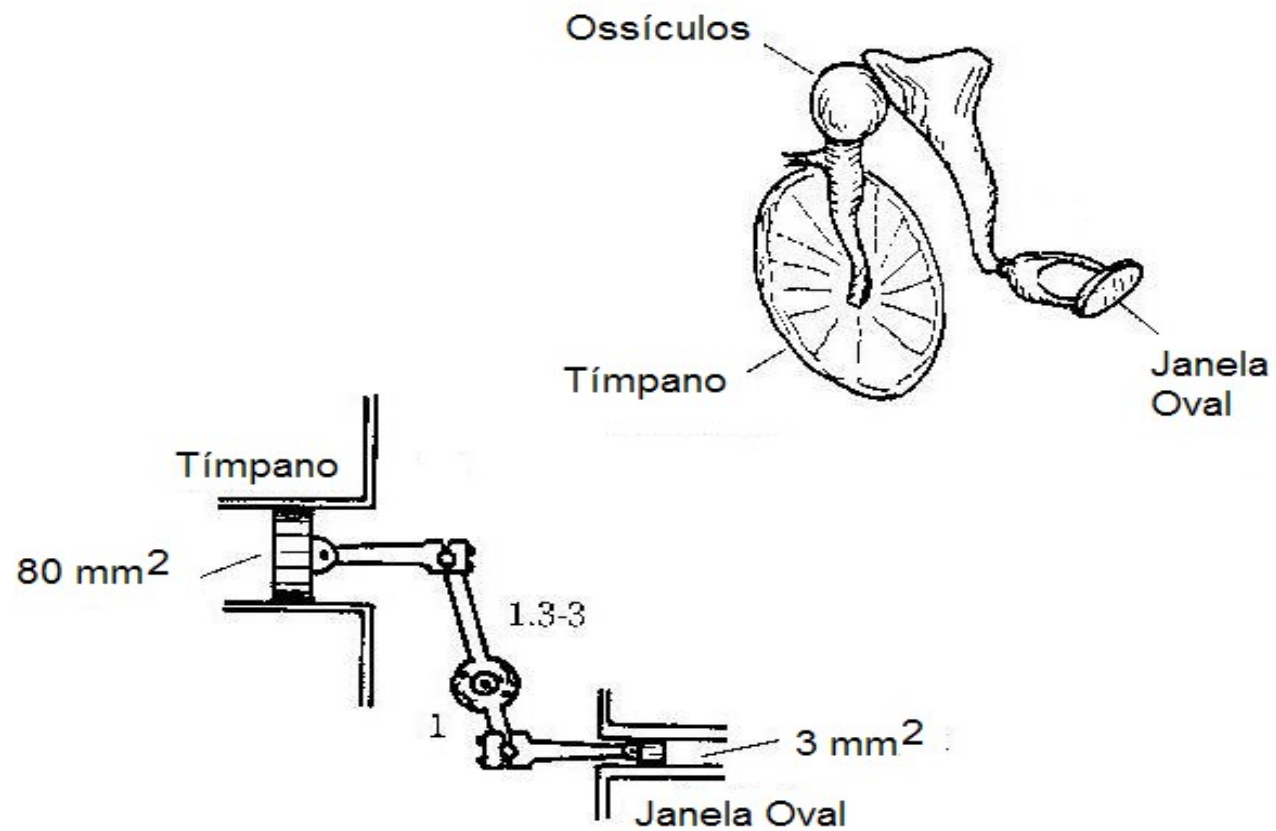
# Representação Esquemática do Ouvido



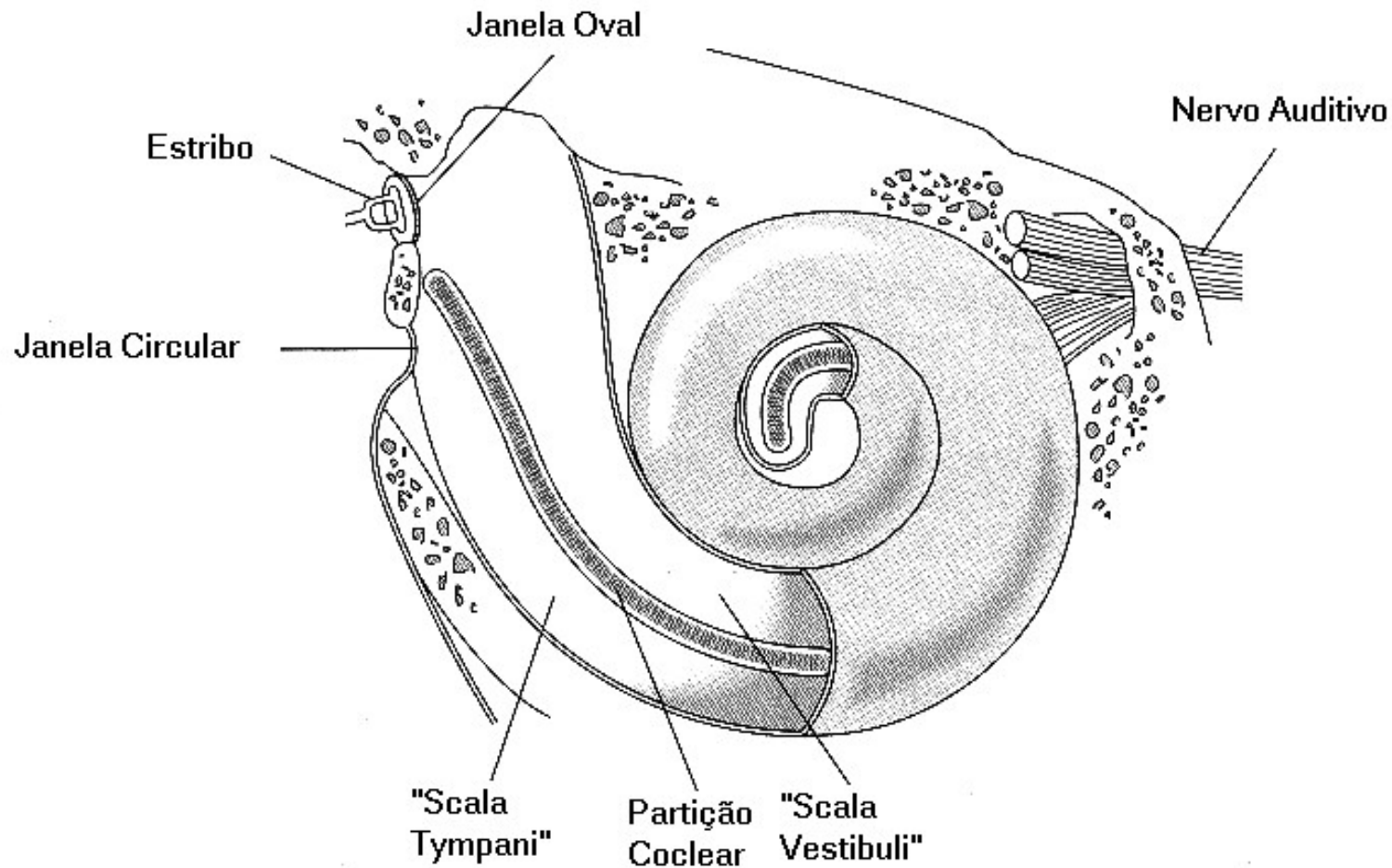
# Resposta em Frequência do Canal Auditivo



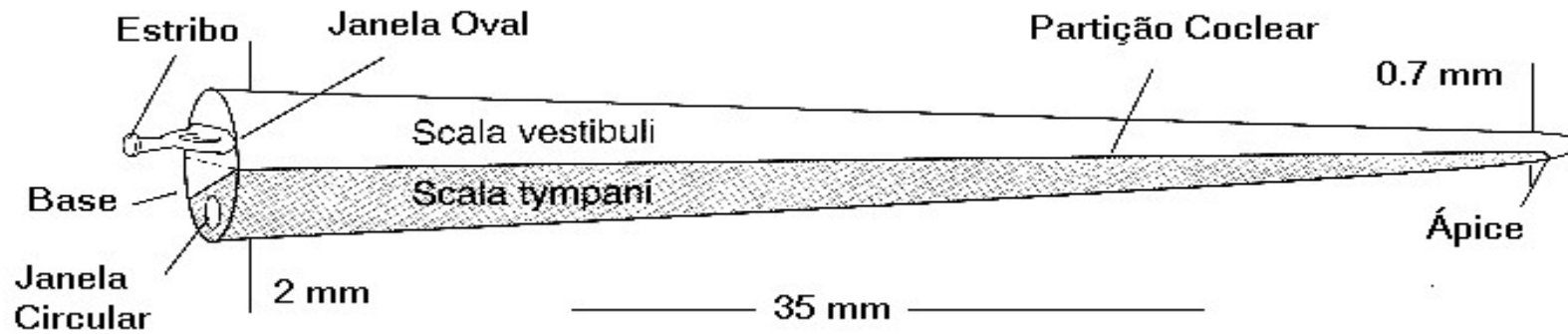
# Ouvido Médio



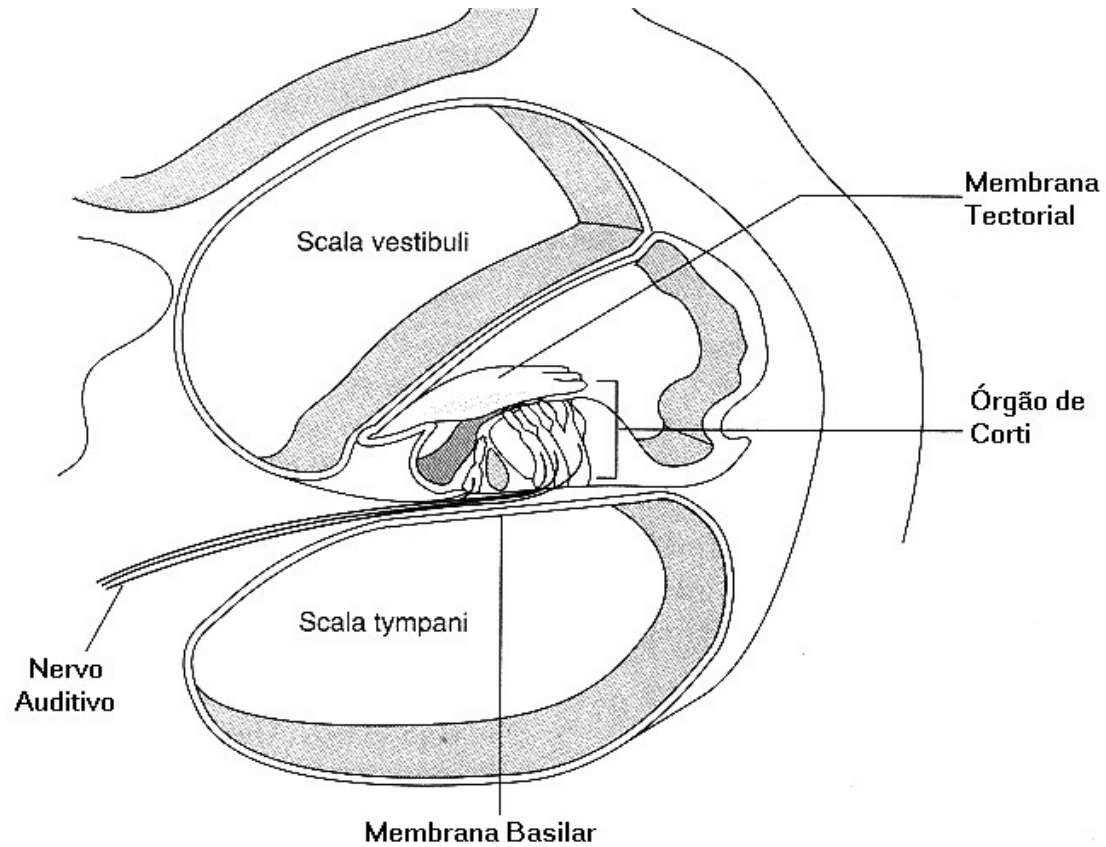
# Estrutura da Cóclea



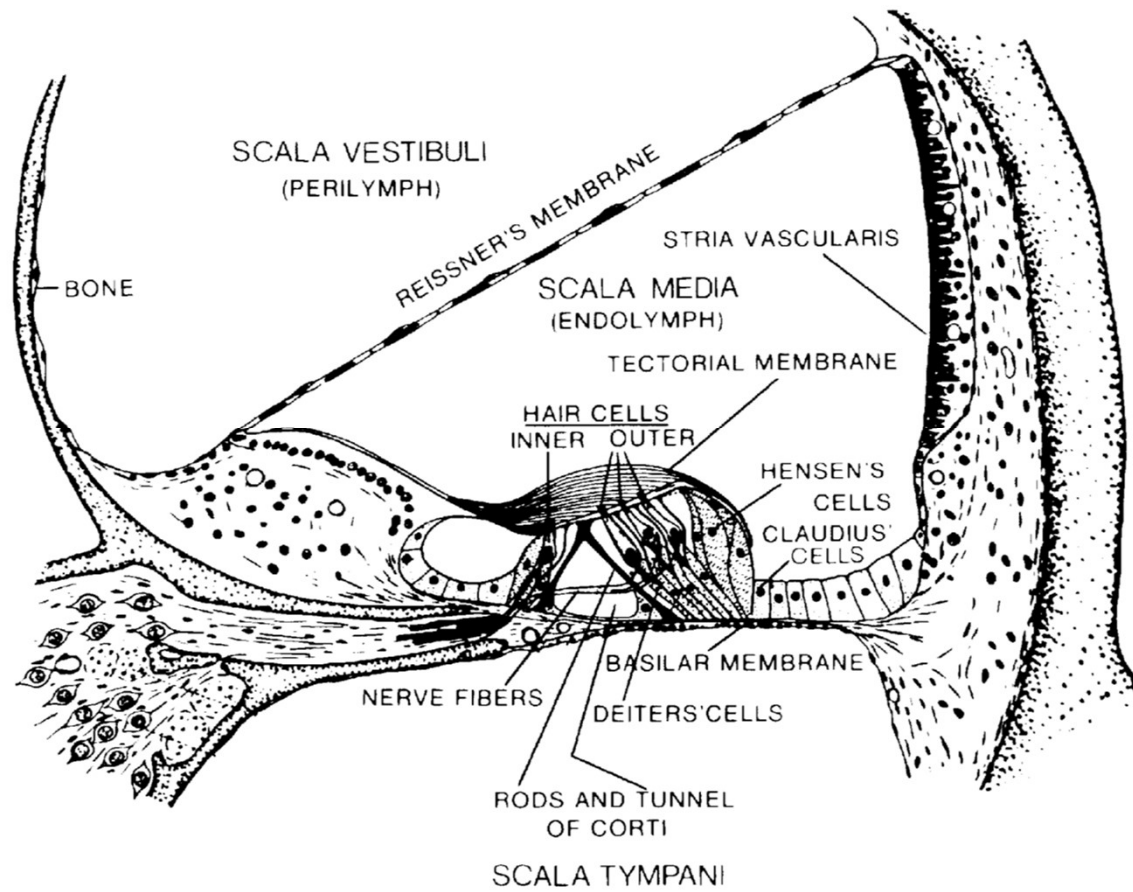
# A Cóclea Distendida



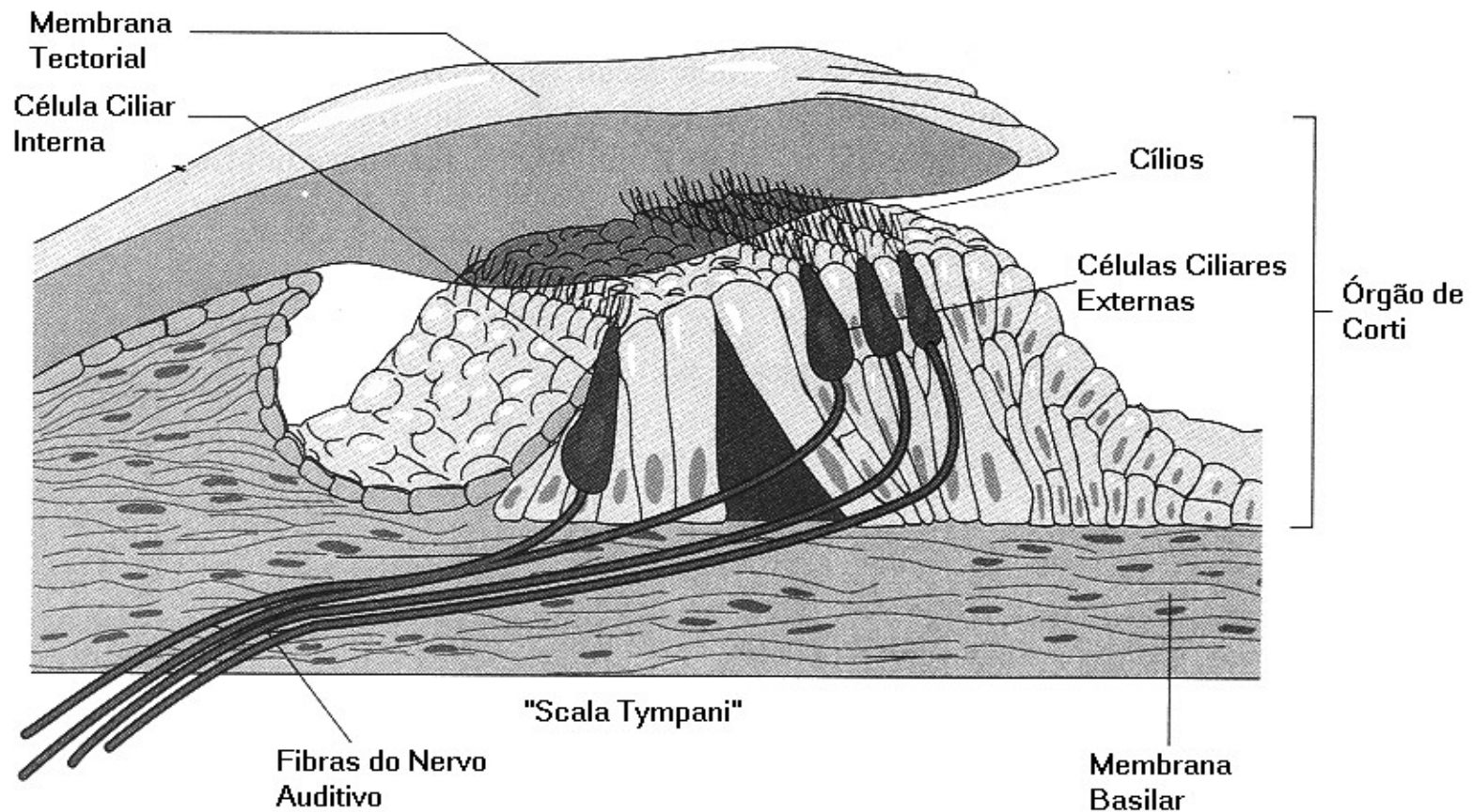
# Secção da Cóclea



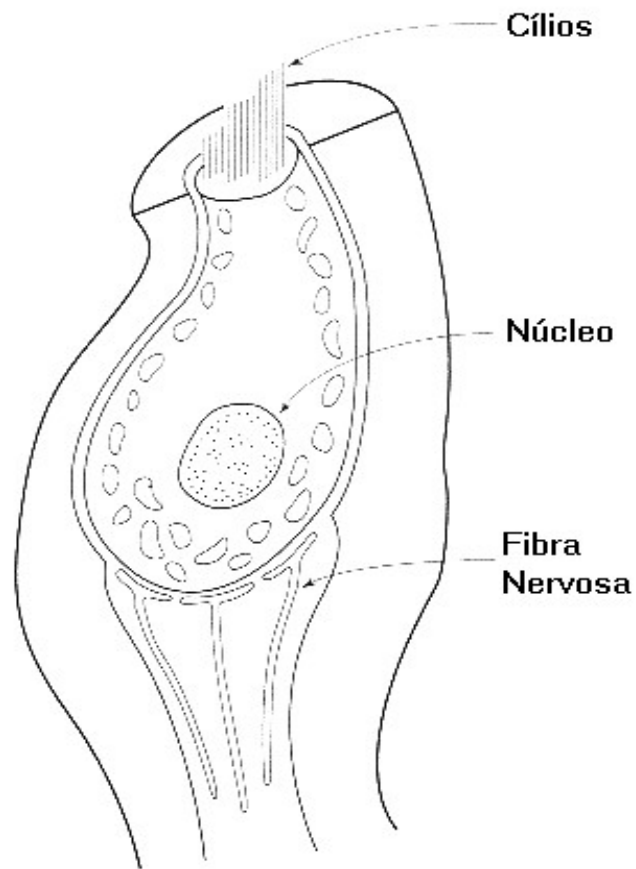
# Secção da Cóclea



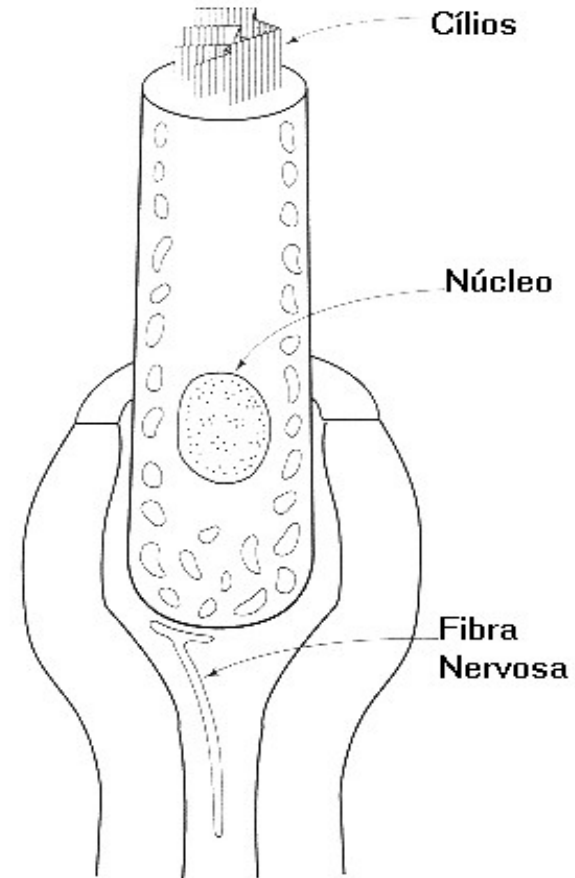
# Detalhe dos Órgãos de Corti



# Células de Corti

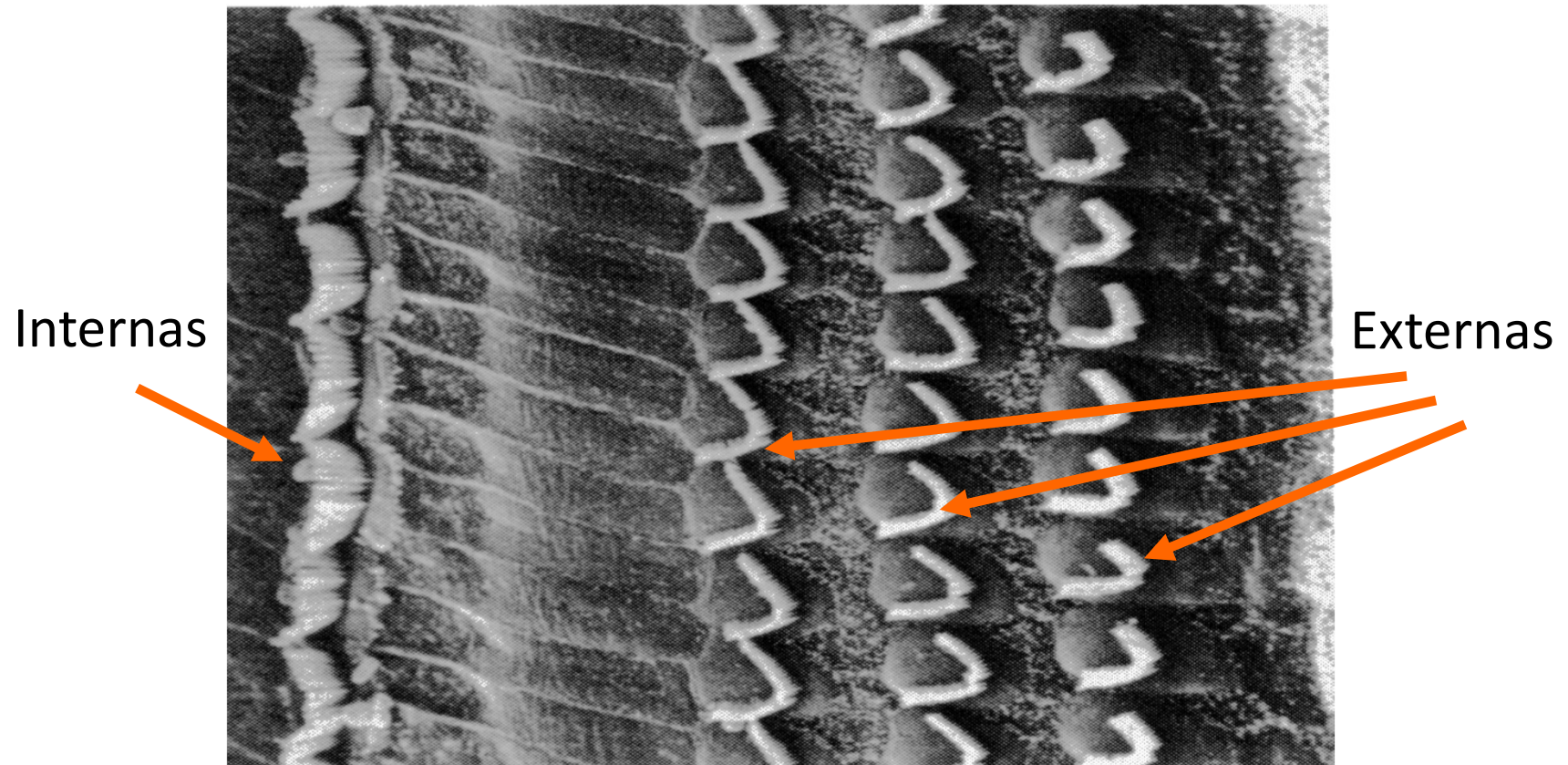


Célula Ciliar Interna

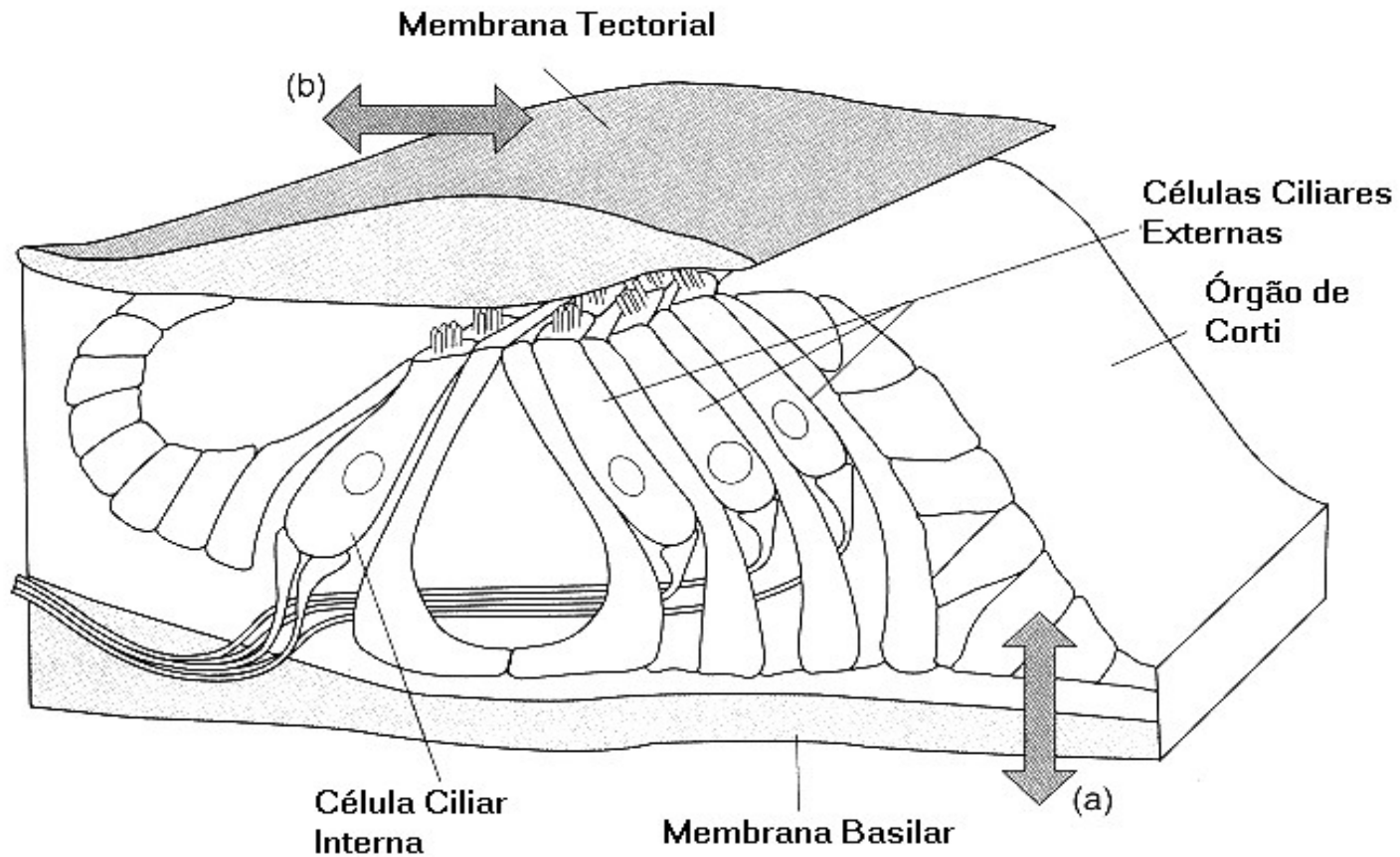


Célula Ciliar Externa

# Células de Corti

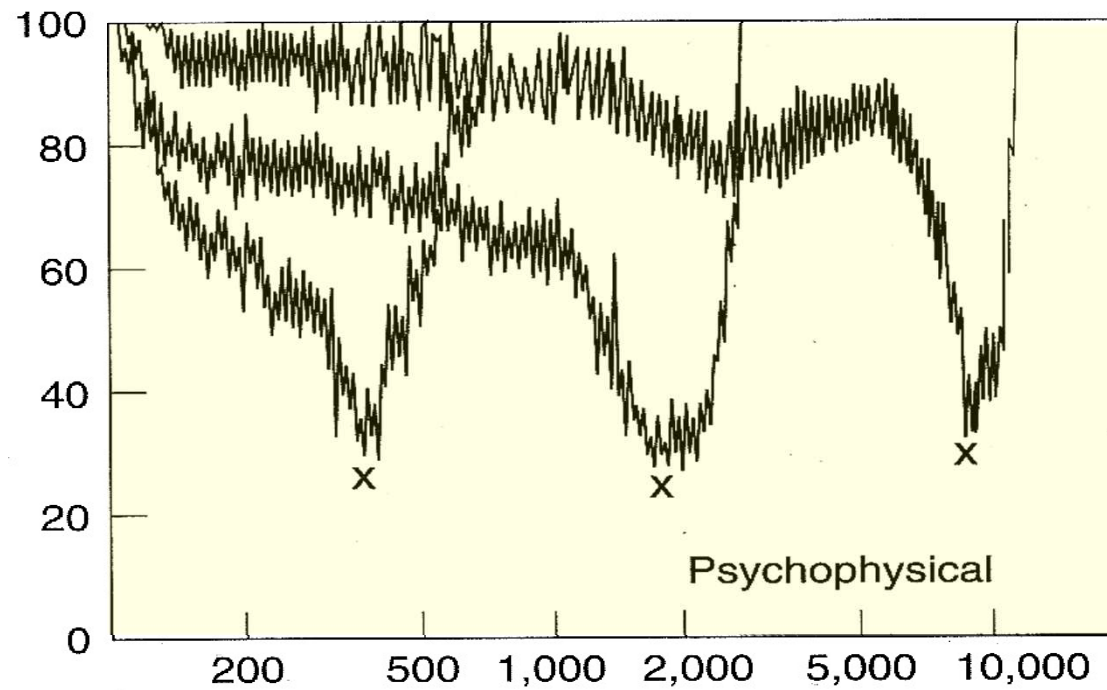


# Atuação das Células Ciliares

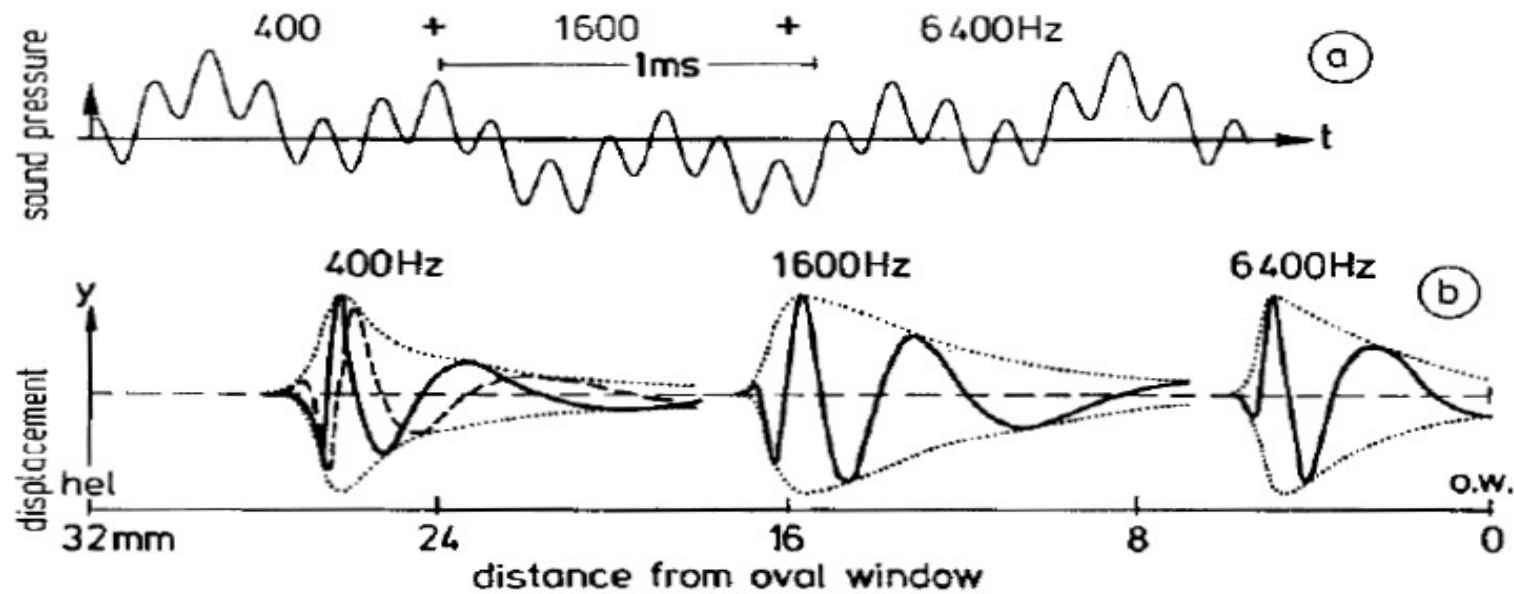


- 3.500 Células Ciliares Internas
- 12.000 Células Ciliares Externas
- 30.000 Fibras Nervosas Aferentes:
  - 90~95% provenientes das Células Internas
  - Células Internas com até 20 sinapses
- ~500 Fibras Nervosas Eferentes:
  - Destinadas às Células Externas

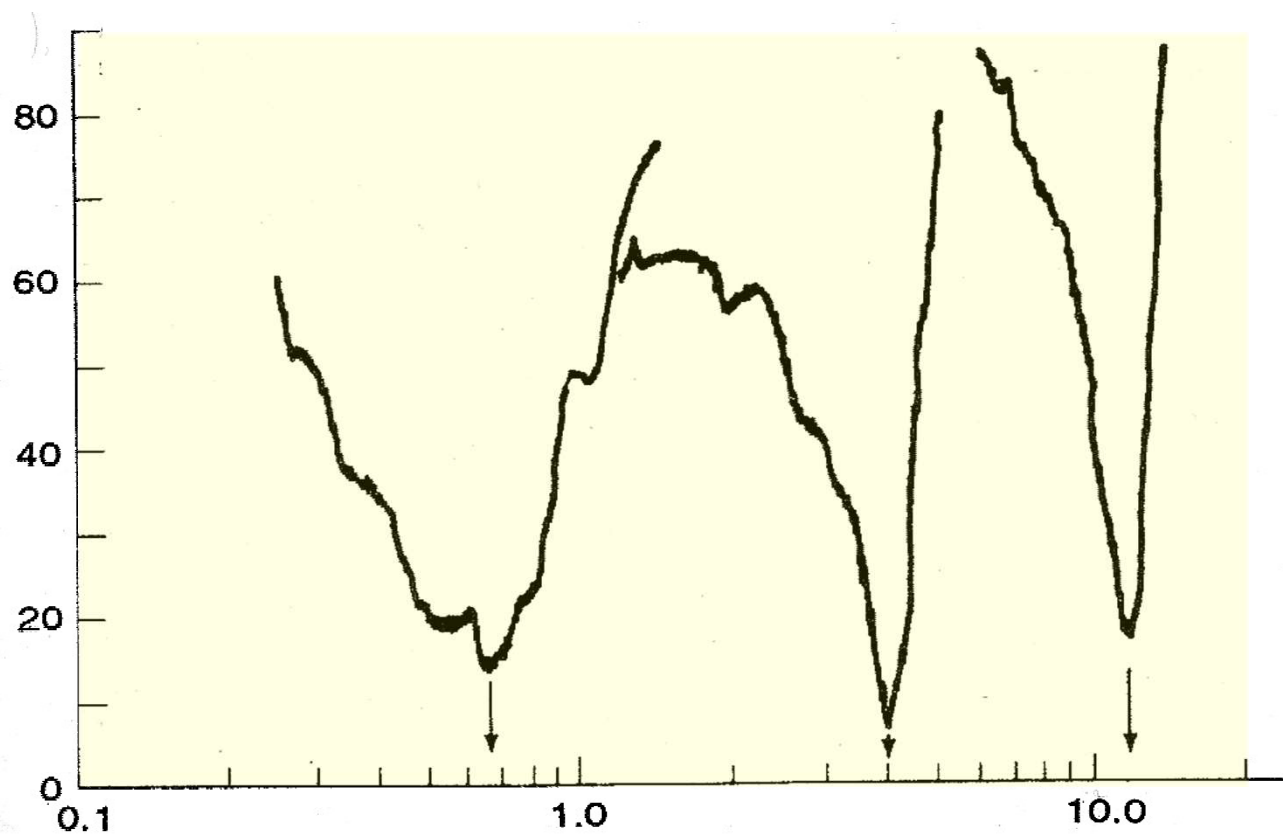
# Seletividade da Membrana Basilar



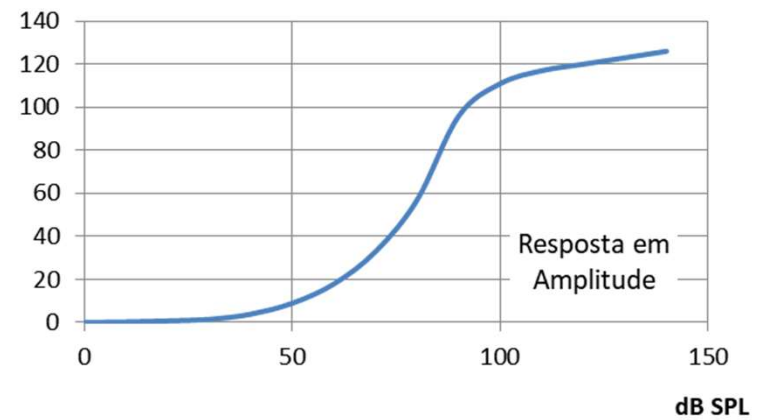
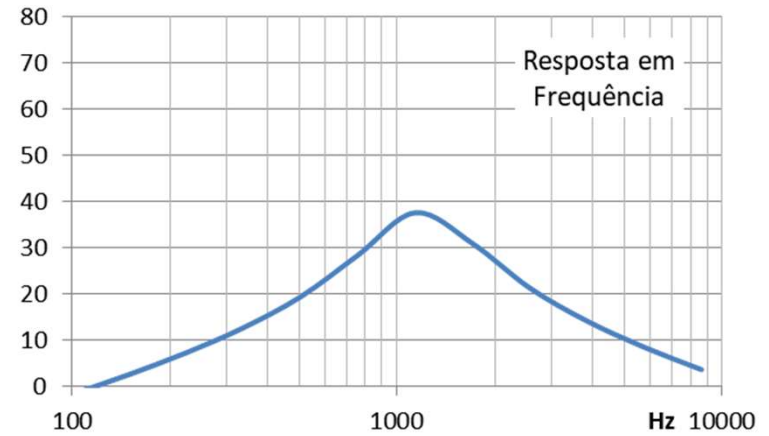
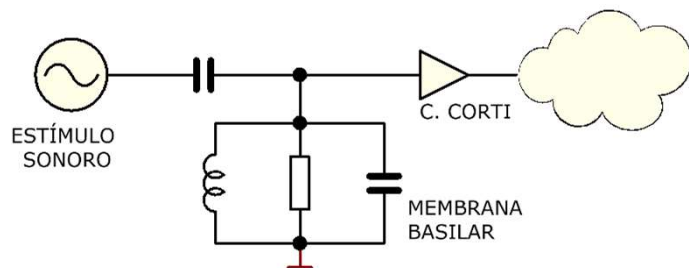
# Seletividade da Membrana Basilar



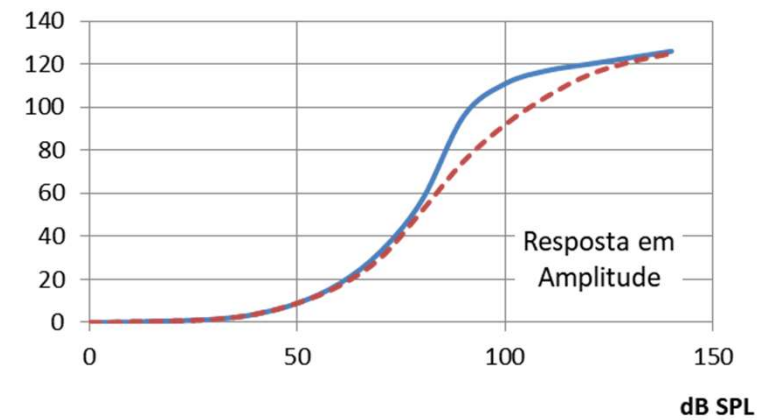
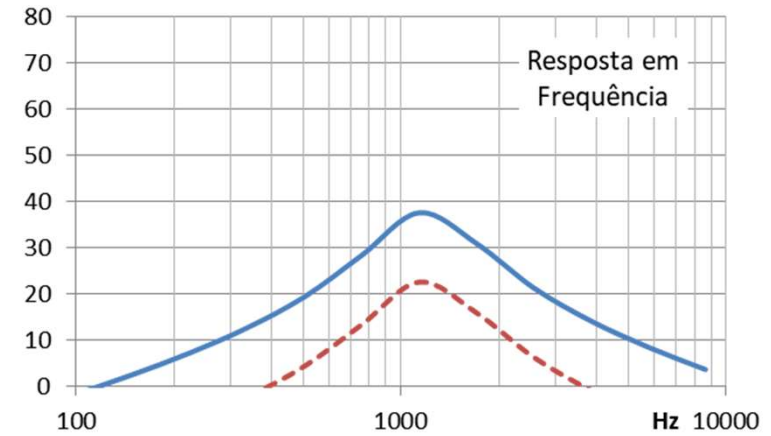
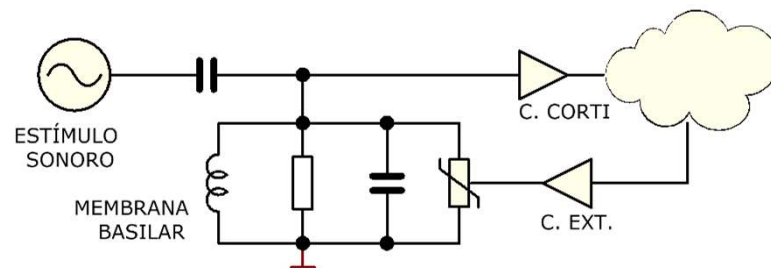
# Seletividade das Células de Corti



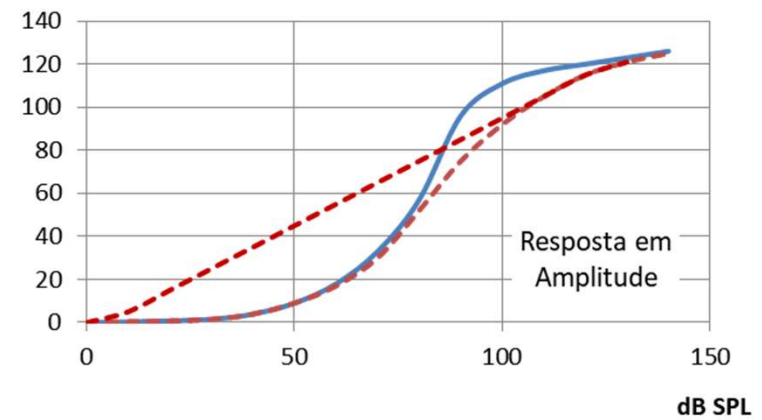
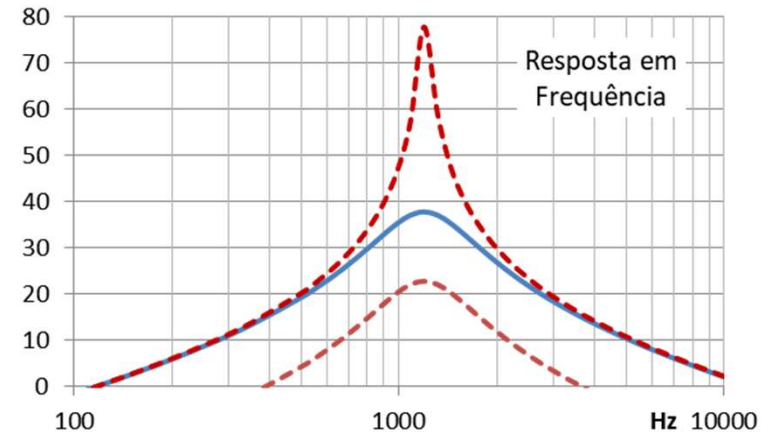
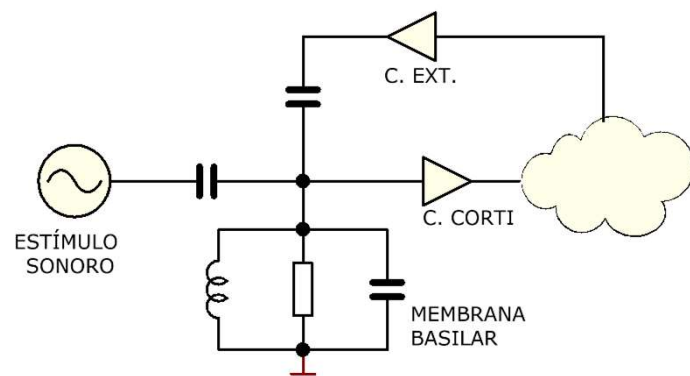
# Resposta das Células Internas



# Células Externas como Atenuadores



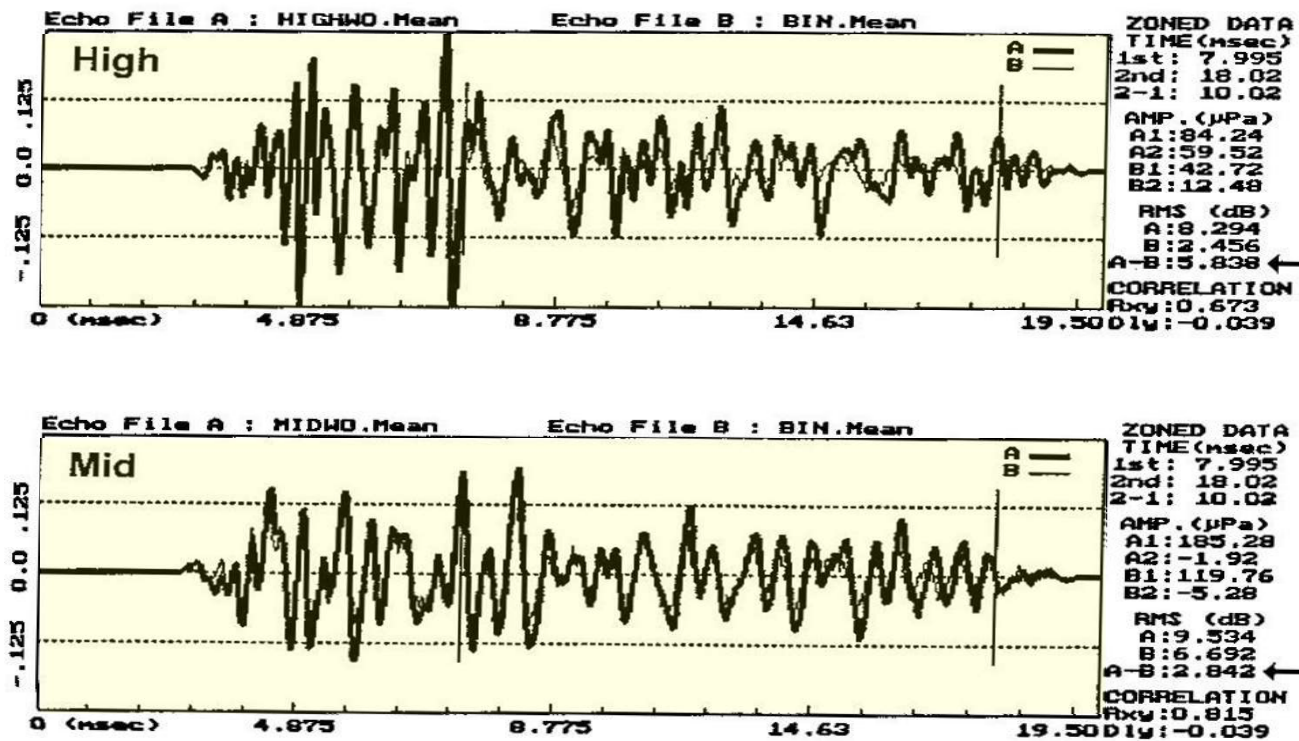
# Células Externas como Atuadores



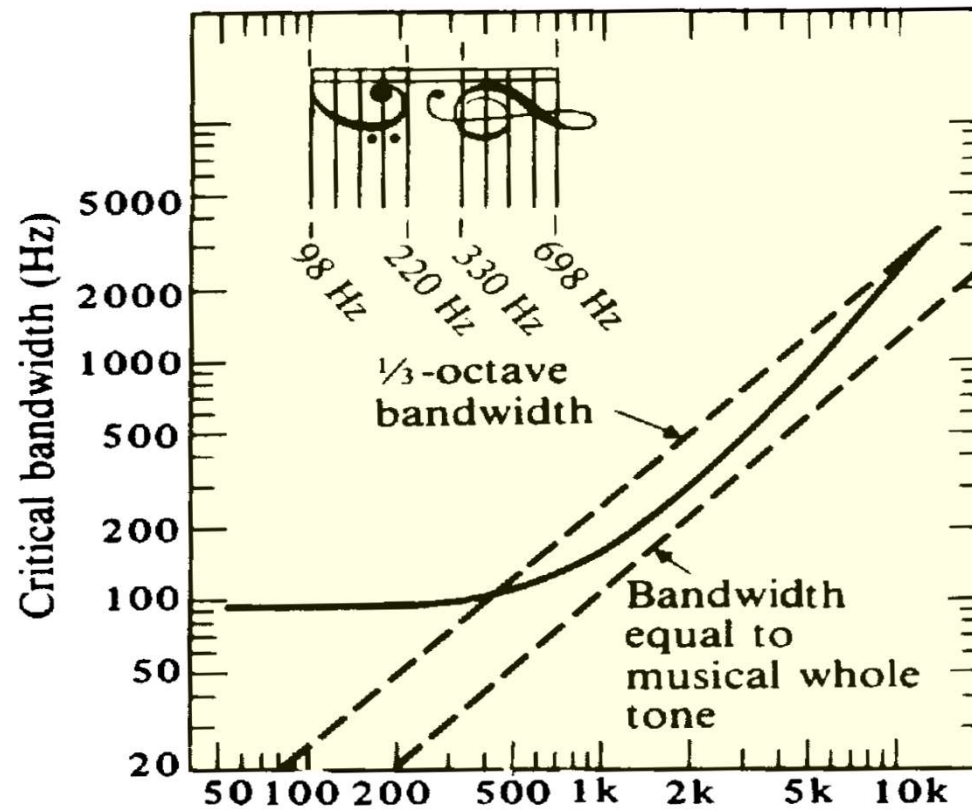
- Células Ciliares Internas:
  - Sensores
  - Faixa dinâmica: ~ 20 a 60 dB
- Células Ciliares Externas:
  - Atuadores
  - Responsáveis pela extensão da faixa dinâmica para até 120 dB
  - Responsáveis pelo aumento de seletividade

# Emissões Oto-acústicas Evocadas

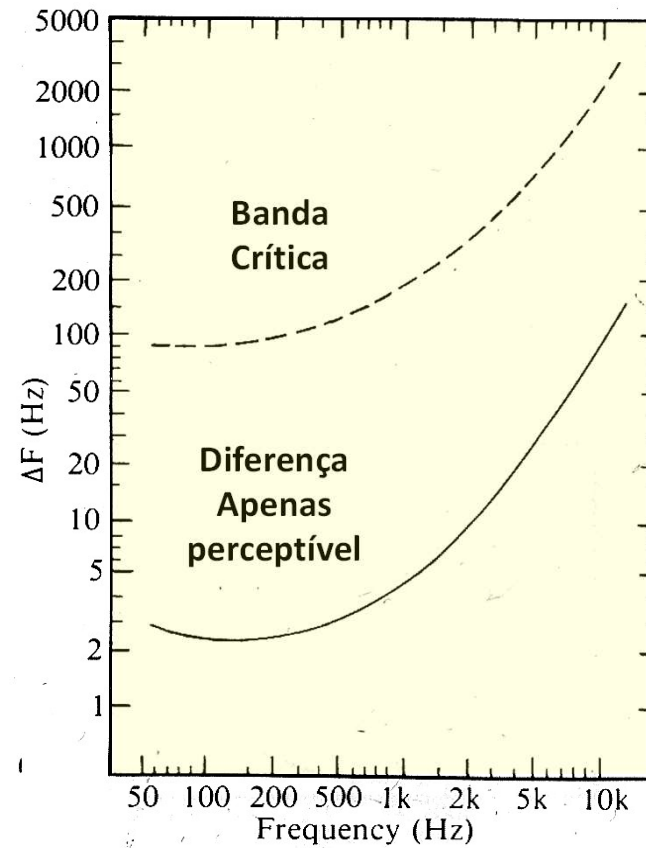
TEOAE (*Transient Evoked Oto-Acoustic Emission*)  
- Evidências da atividade das células externas



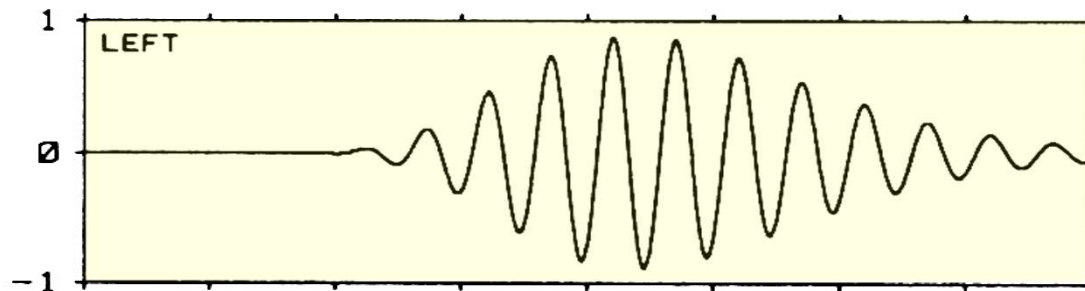
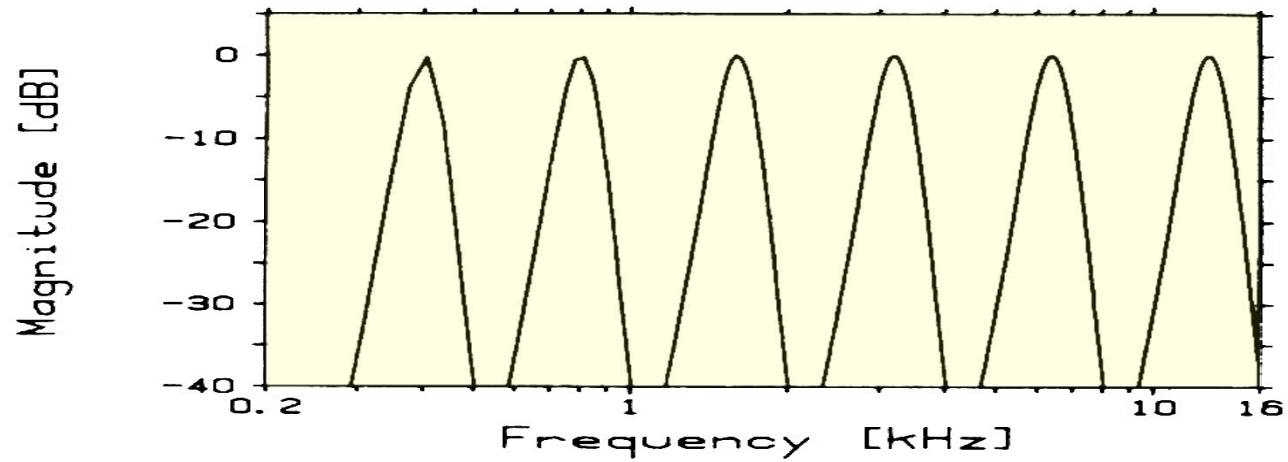
# Bandas Críticas da Audição Humana



# Limiar de Percepção de Frequências

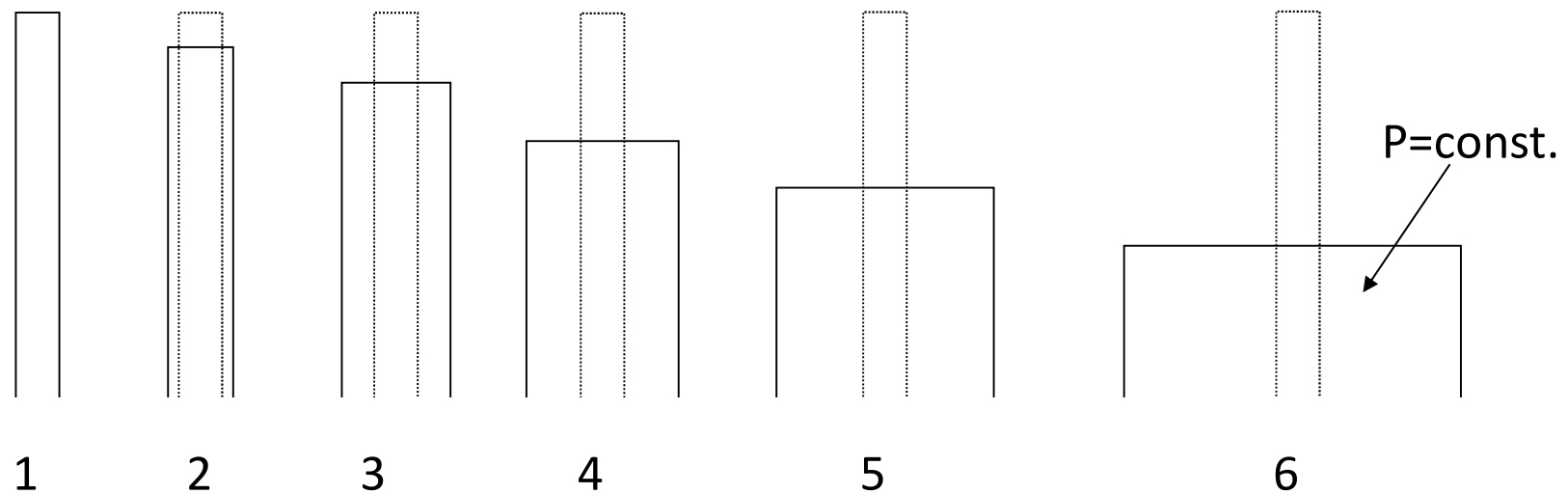


# Resposta Temporal das Bandas Críticas

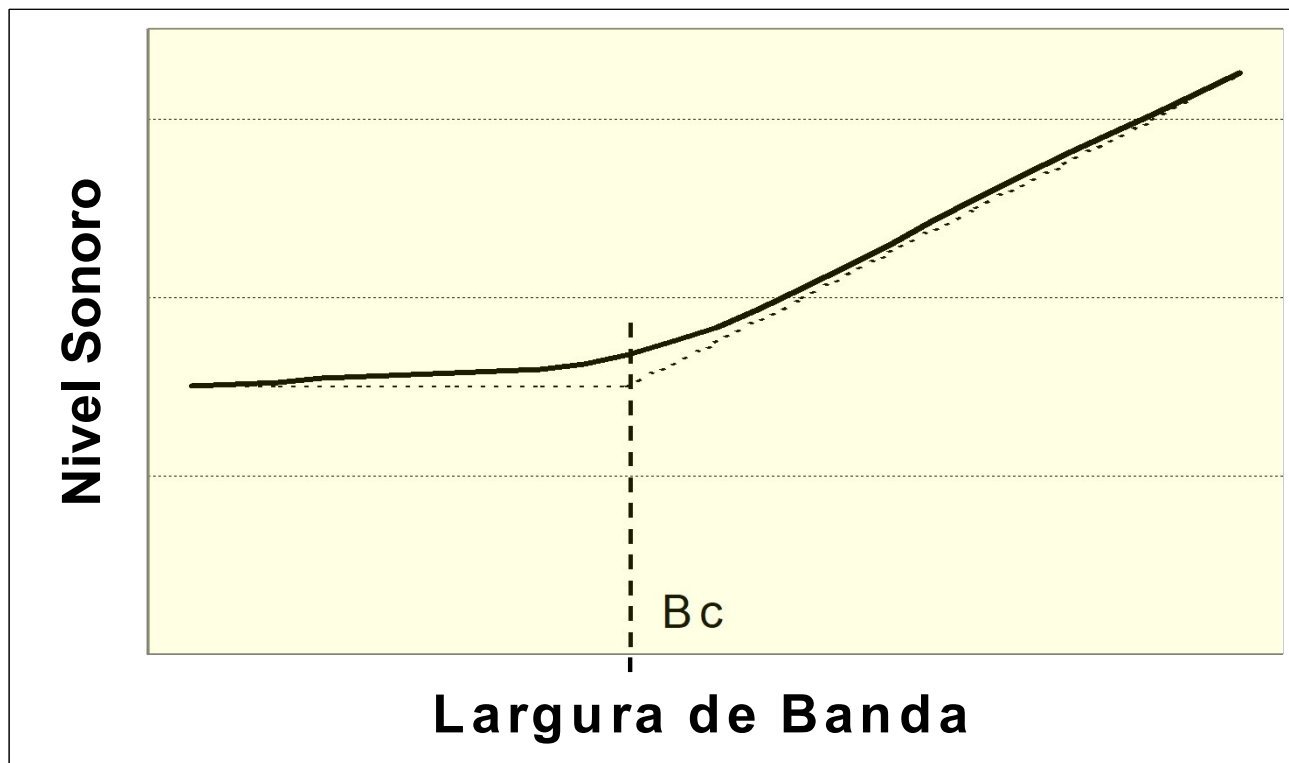


5 ms/div

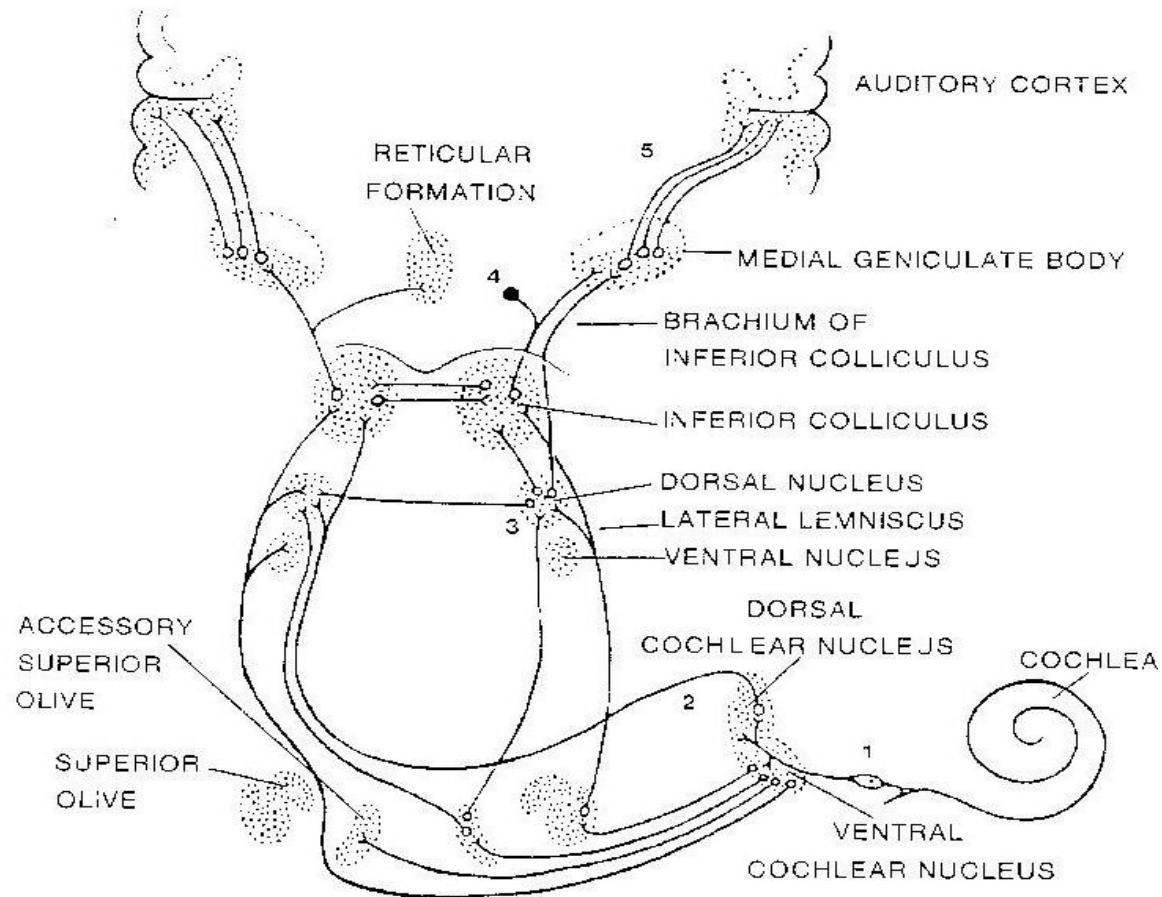
# Determinação da Largura das Bandas Críticas



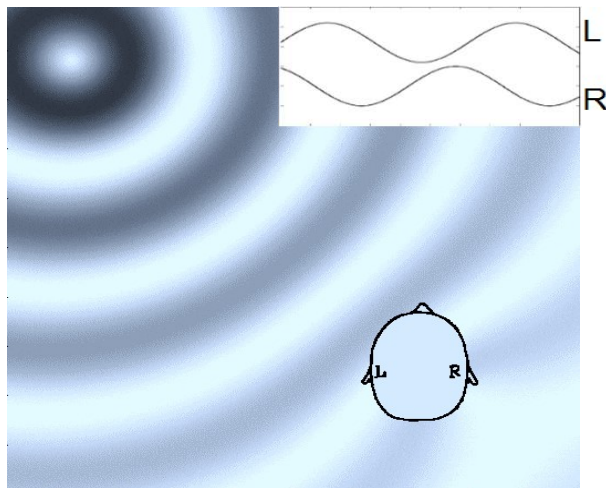
# Determinação da Largura das Bandas Críticas



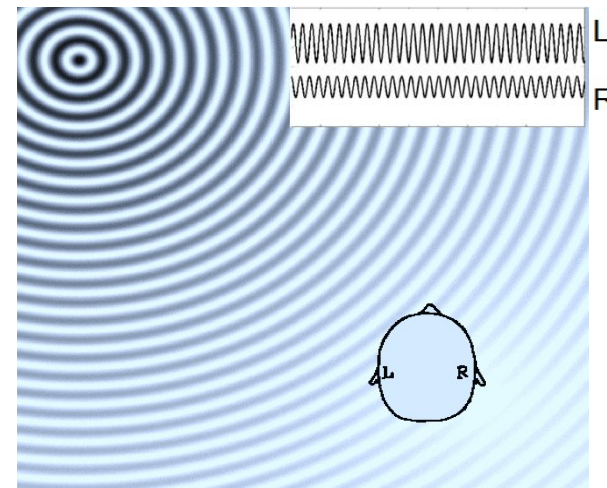
# Pós-processamento nos Gânglios Auditivos



# Percepção de Direção (Azimute)

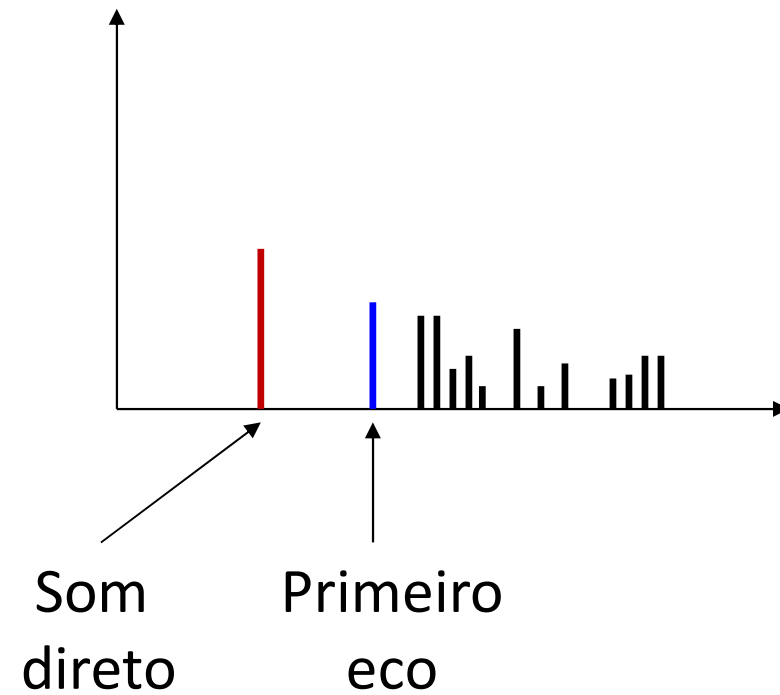
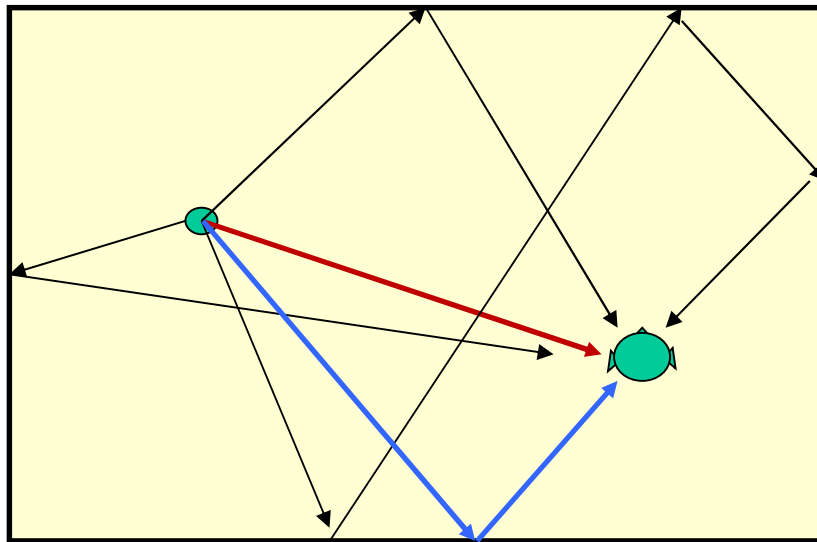


Baixas Frequências:  
Diferença de Fase  
(tempo de Percurso)

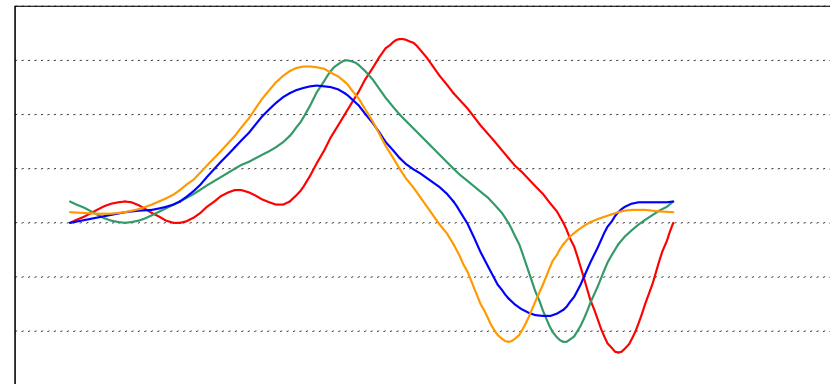
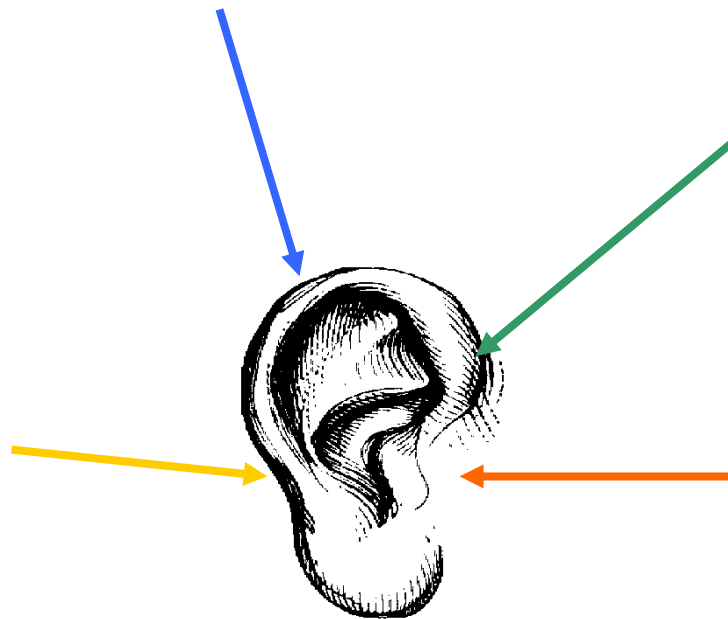


Altas Frequências:  
Diferença de Intensidade  
(difração)

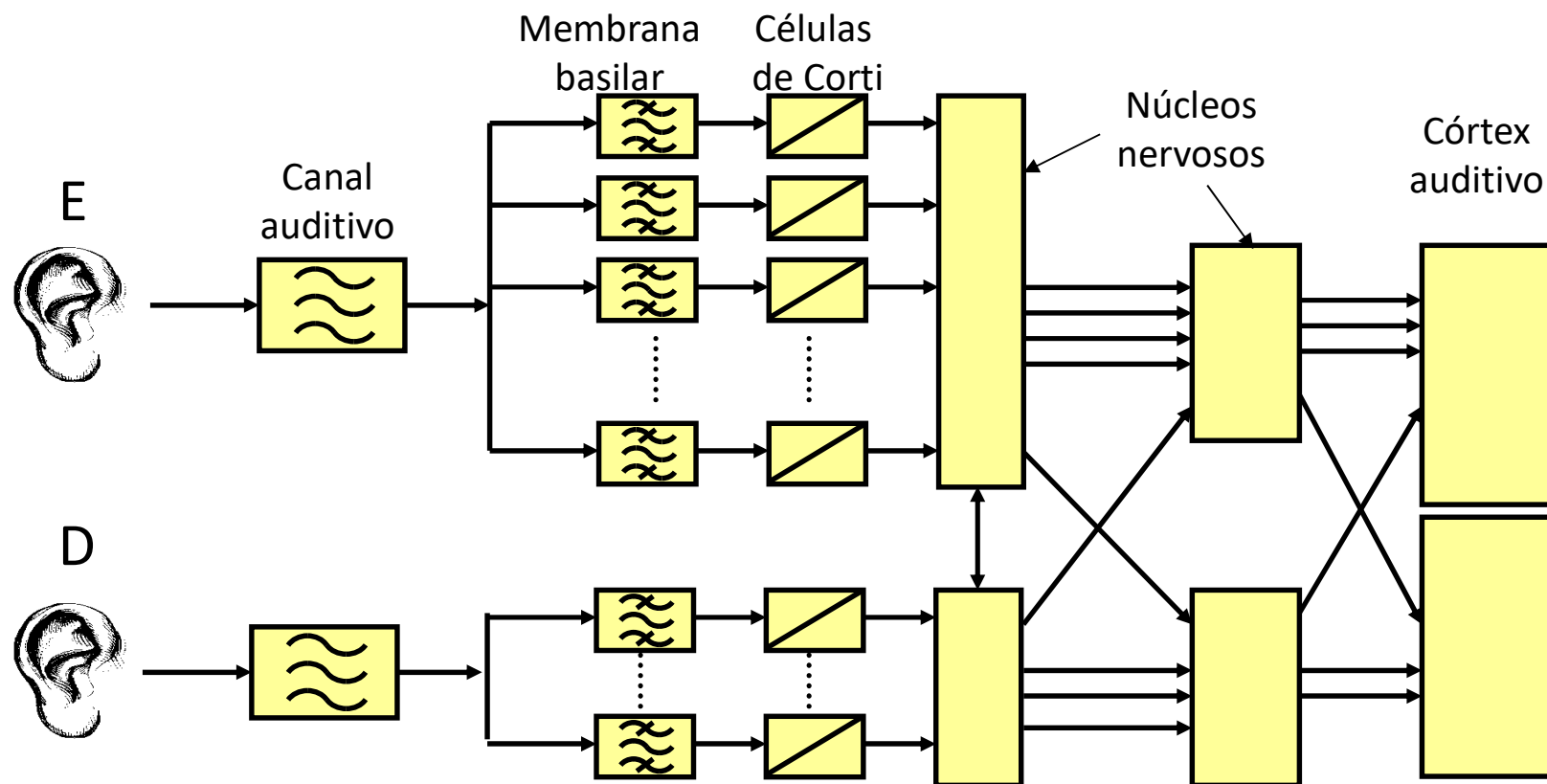
# Percepção de Ambiente: Reflexões Múltiplas



# Percepção de Direção (Elevação)



# Um Diagrama de Blocos da Audição



# Acústica Física

- Limiar de Audibilidade:  $20 \mu\text{Pa rms} = 2 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2 @ 1 \text{ kHz}$  ( $1 \text{ pw/m}^2$ )

$$\text{Pressão Sonora} = 20 \log \frac{p}{p_o} \quad (\text{dbSPL}) \text{ onde } p_o = 20 \mu\text{Pa}$$

- ( Pressão atmosférica:  $\sim 100 \text{ kPa}$  )

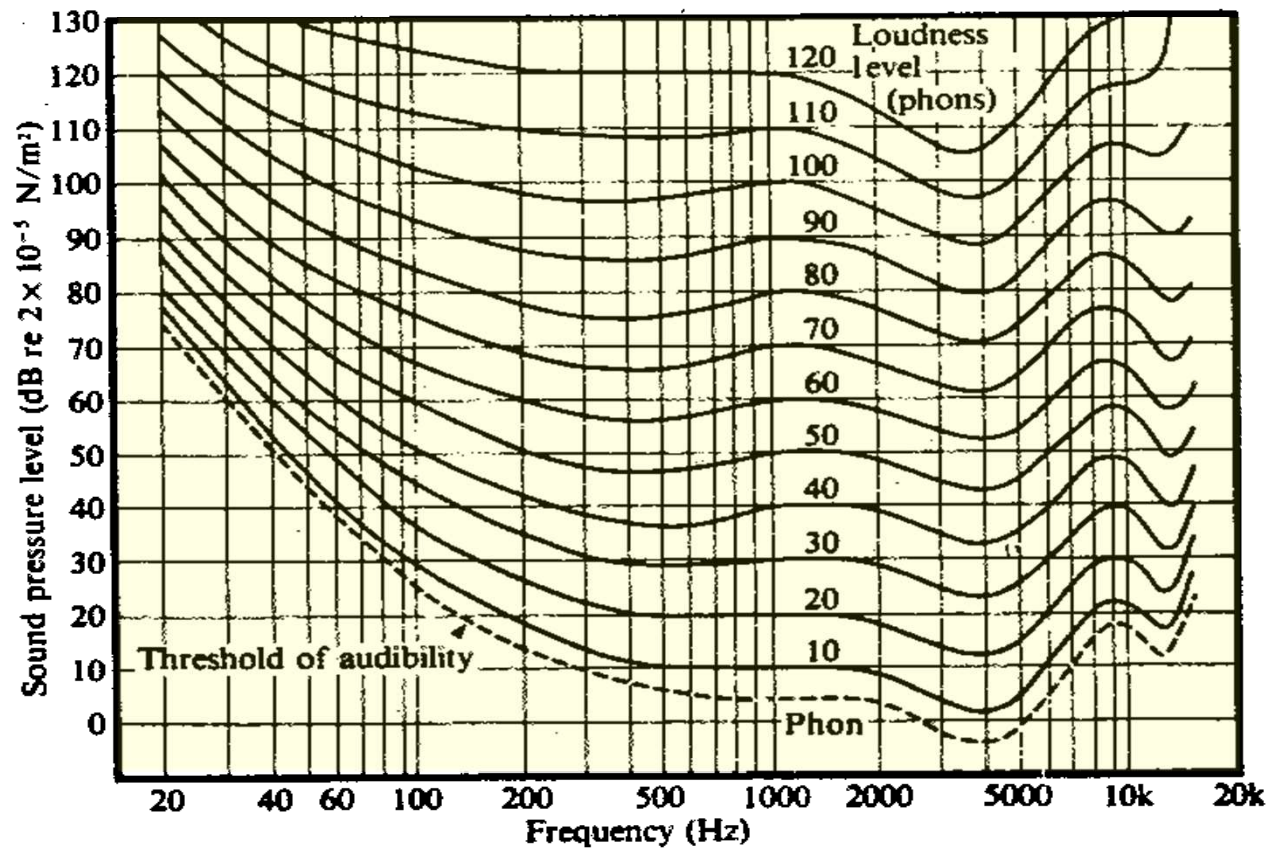
- Volume Sonoro = grandeza subjetiva associada à percepção sensorial da intensidade de um som
  
- 1 Phon = 1 dB SPL @ 1 kHz

# Situações Sonoras

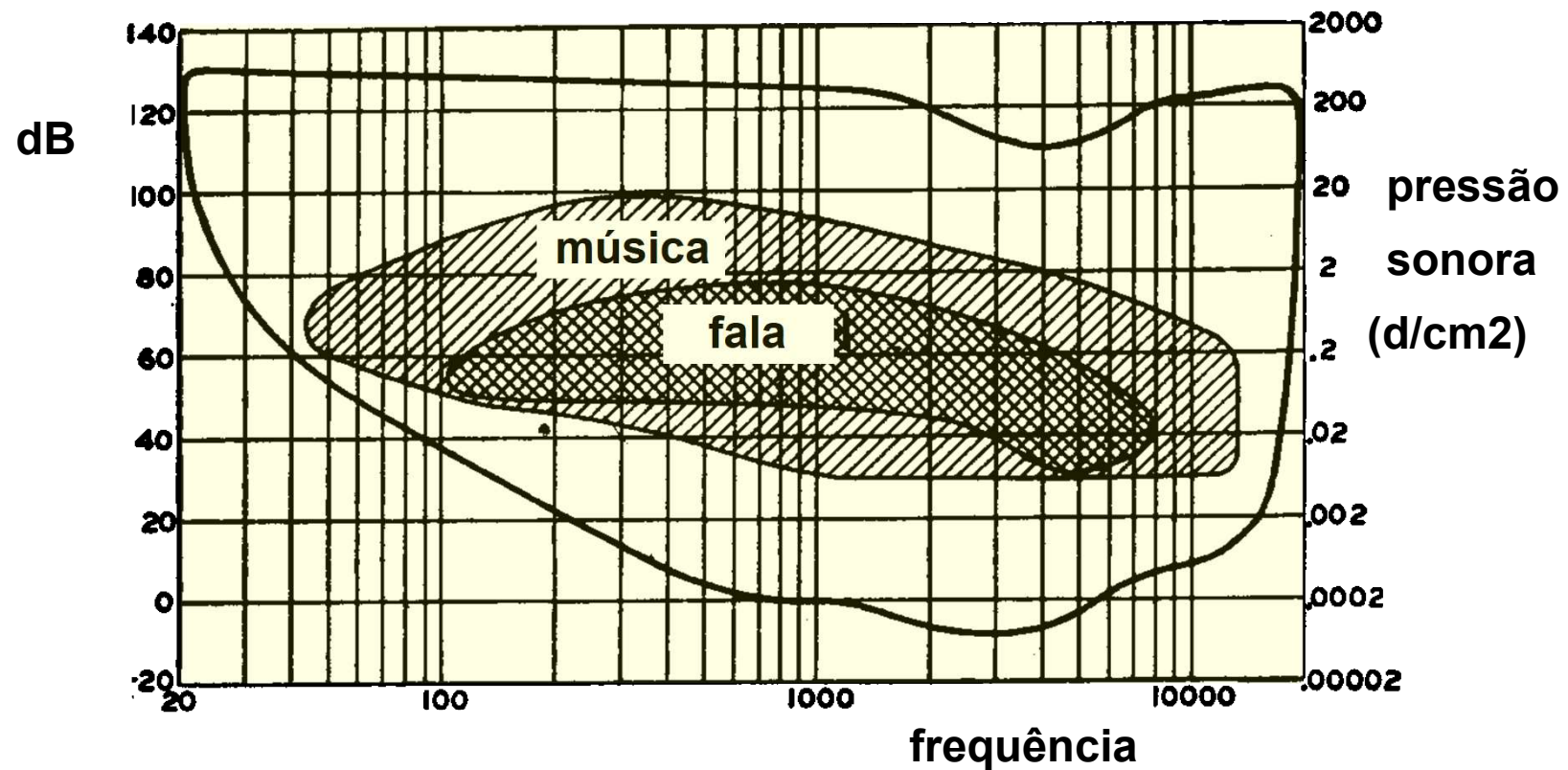
	dB SPL
Foguete	195
Avião a jato	155
Limiar de dor	140
Limiar de desconforto	120=1W/m <sup>2</sup>
Orquestra fortíssimo	110
Rebitadeira	100
Fábrica	78
Tráfego pesado	68
Escritório ruidoso	65

	dB SPL
Conversaço	65
Restaurante	60
Residência urbana	40
Casa de campo	30
Orquestra pianíssimo	30
Estúdio de gravação	20
Folhagens na brisa	10
Limiar de audição	0=1pw/m <sup>2</sup>
Ruído térmico do ar	-10

# Curvas de Igual Volume Sonoro (tons senoidais)

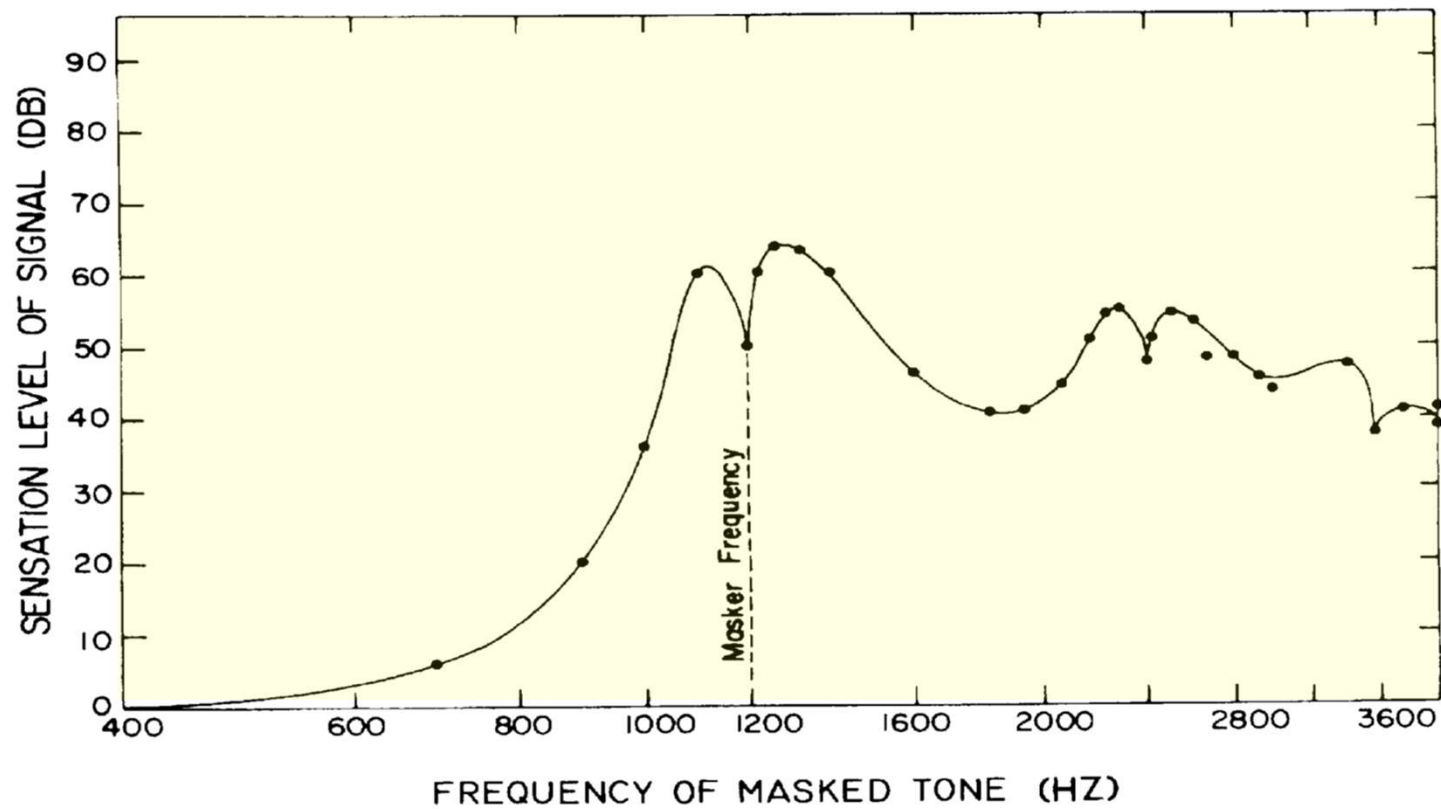


# Faixa Dinâmica para Música e Voz

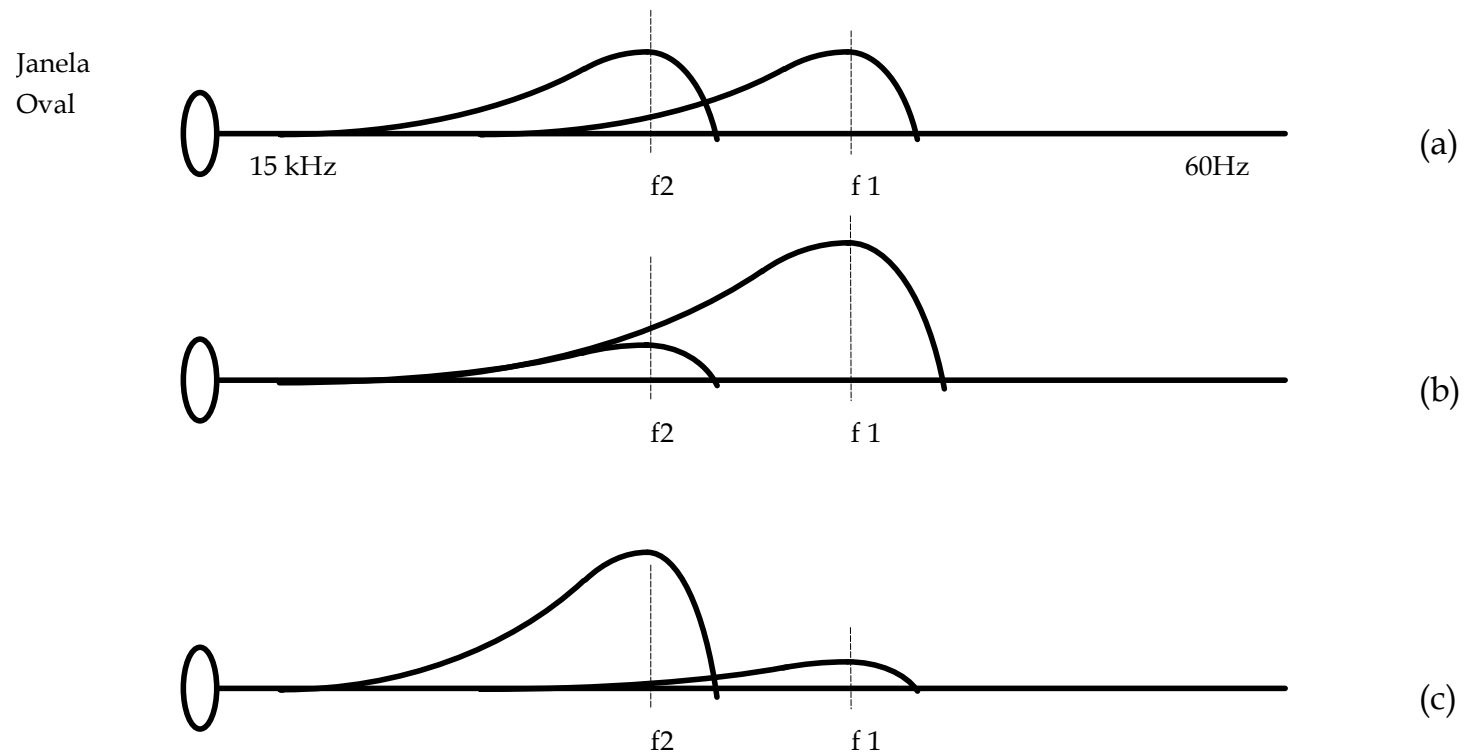


# Mascaramento

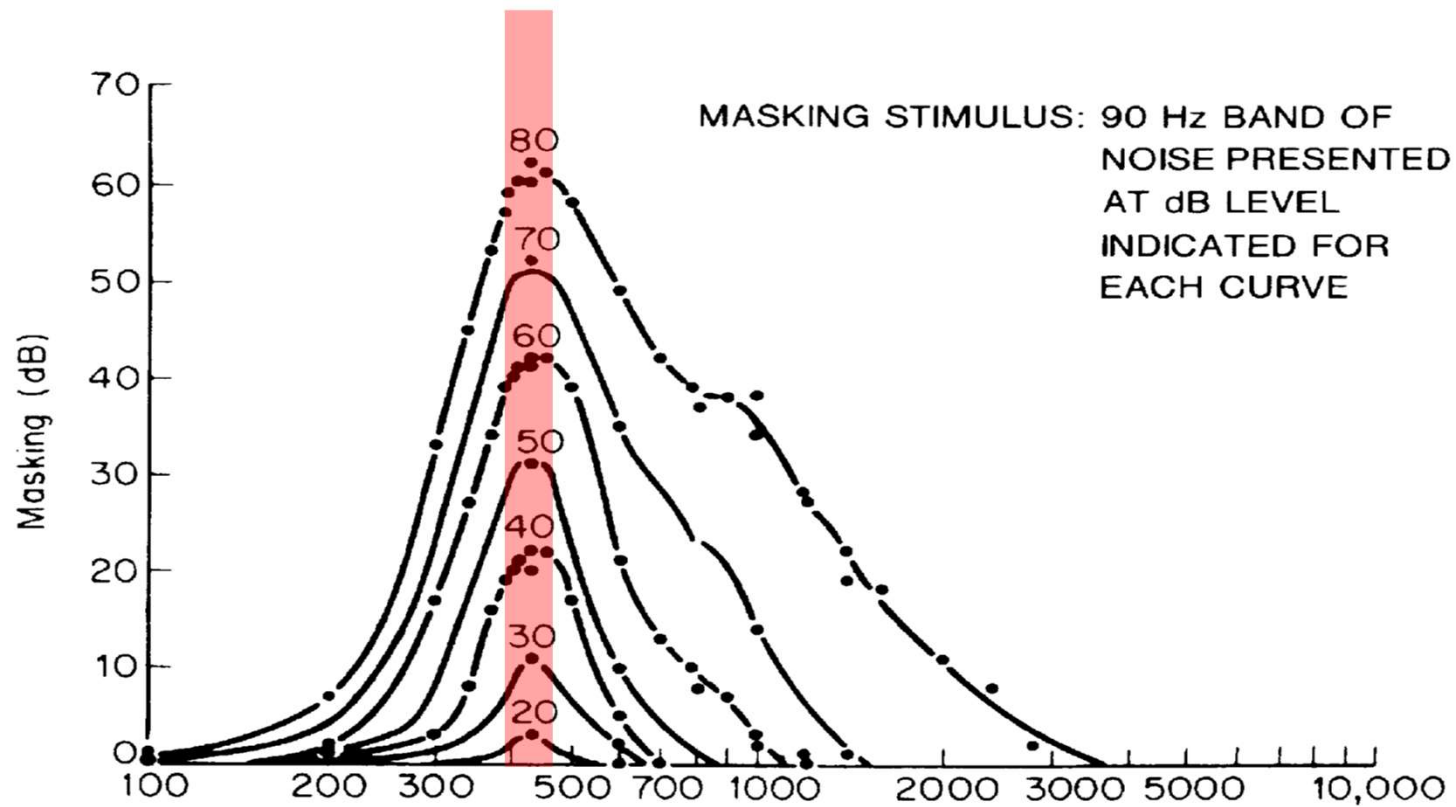
# Mascaramento para Tom Senoidal



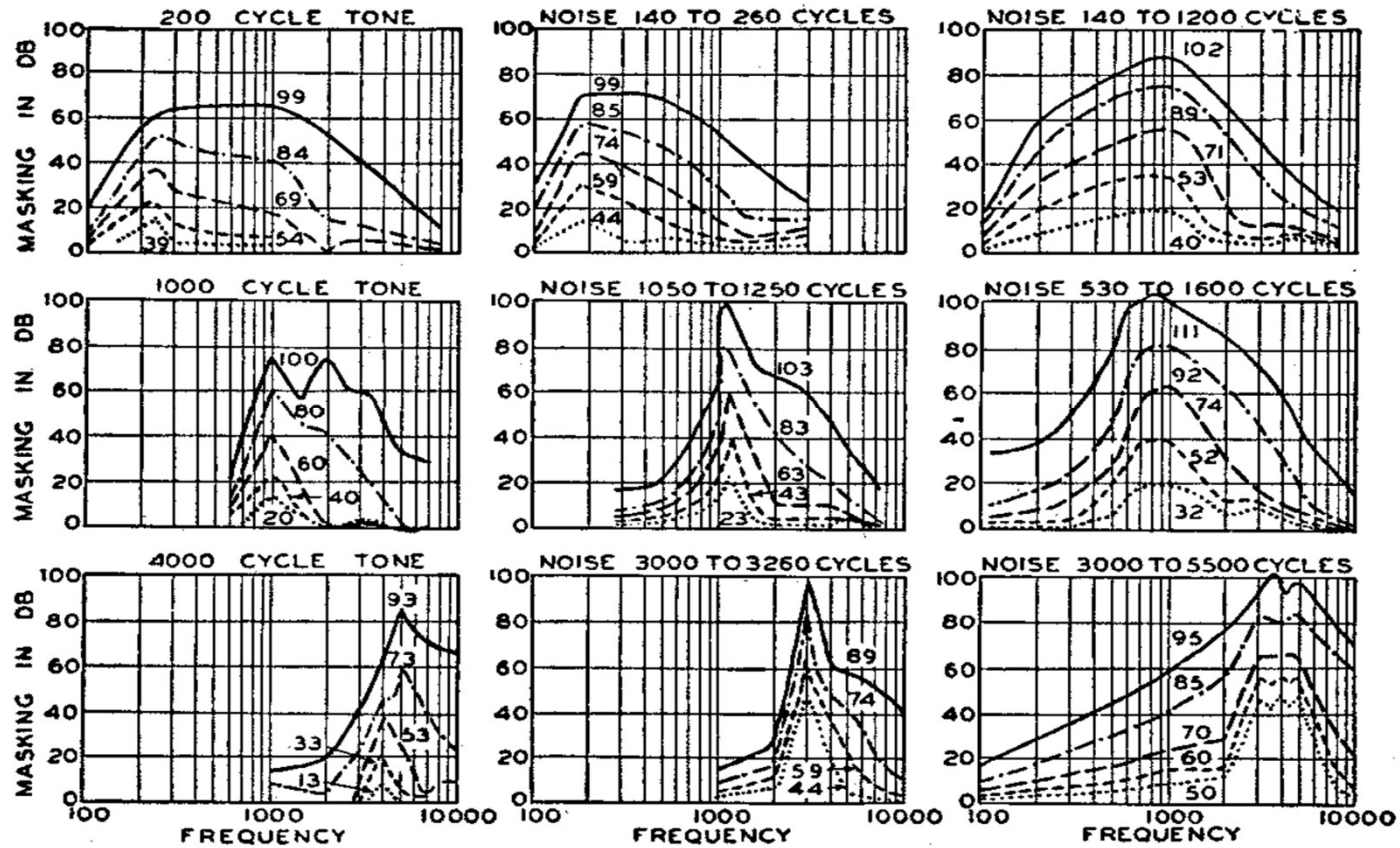
# Resposta da Membrana Basilar para 2 Tons



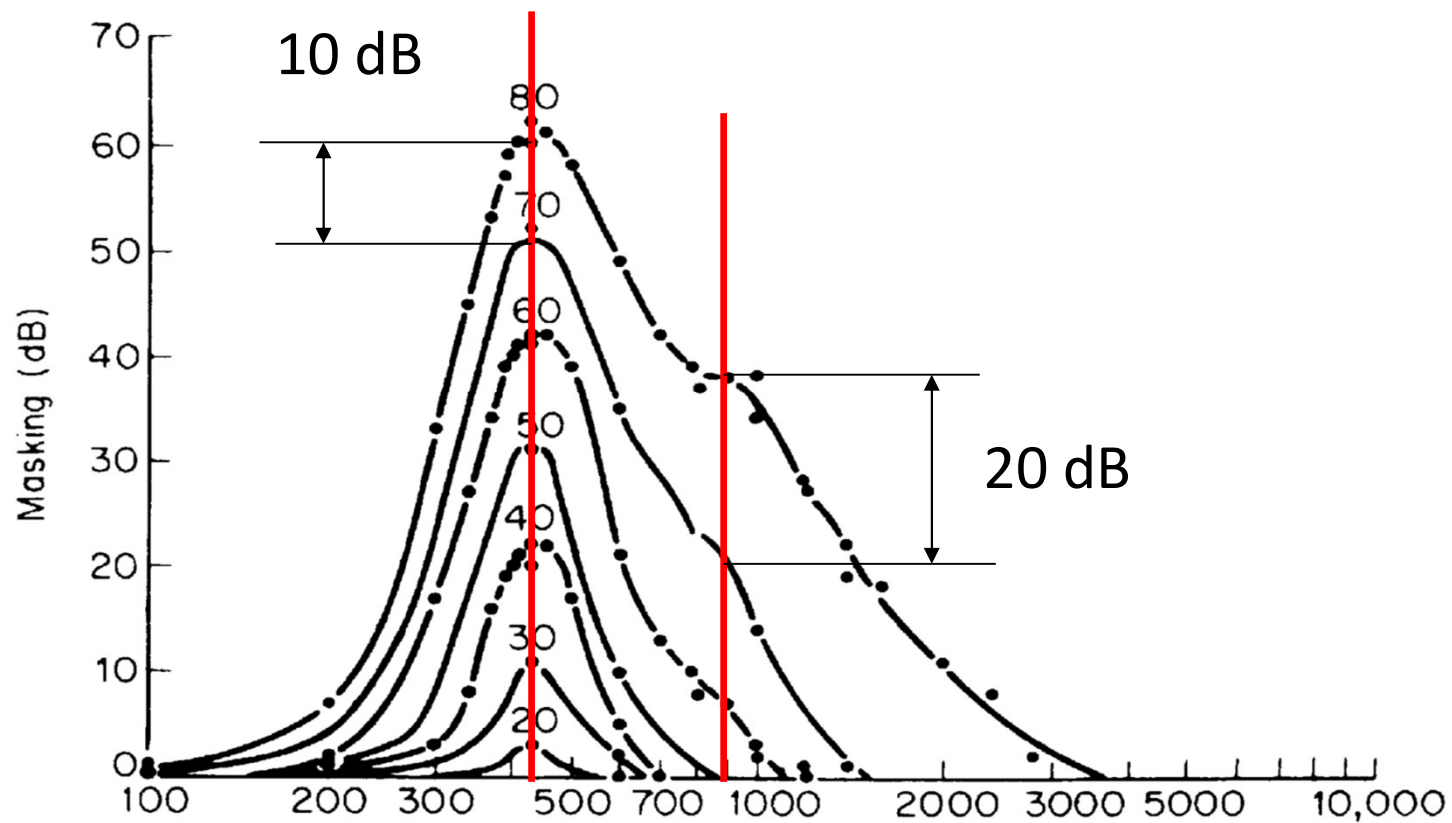
# Exemplo de Mascaramento



# Curvas de Mascaramento (ex.)

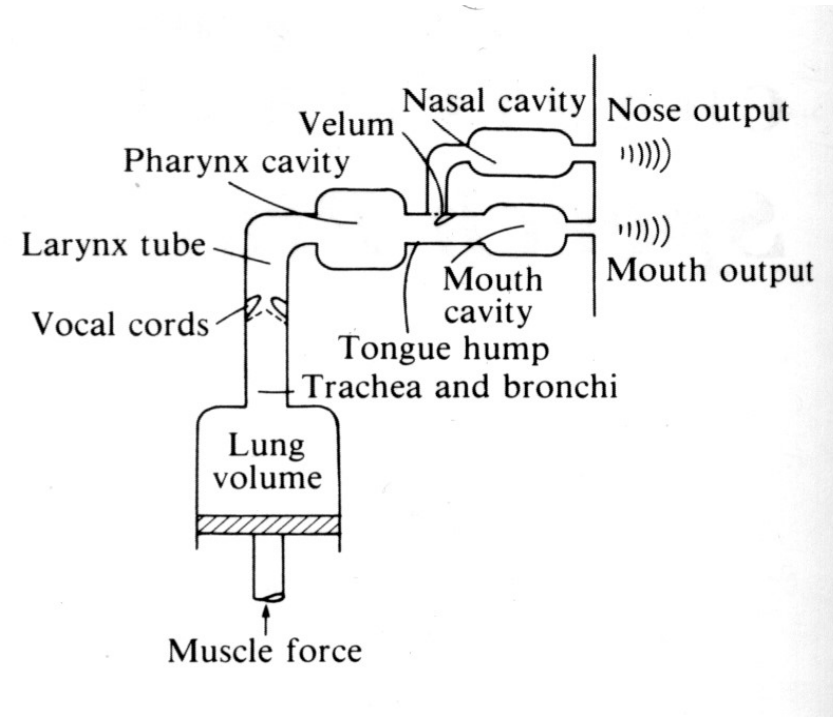
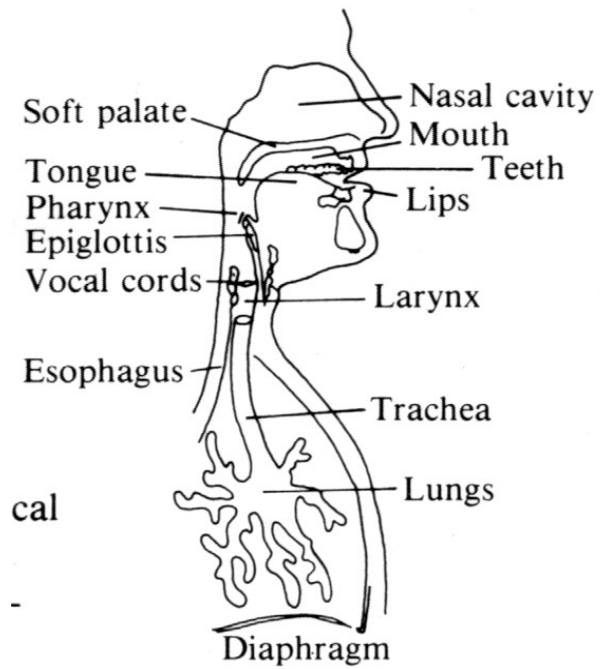


# Evidências de Distorção Aural

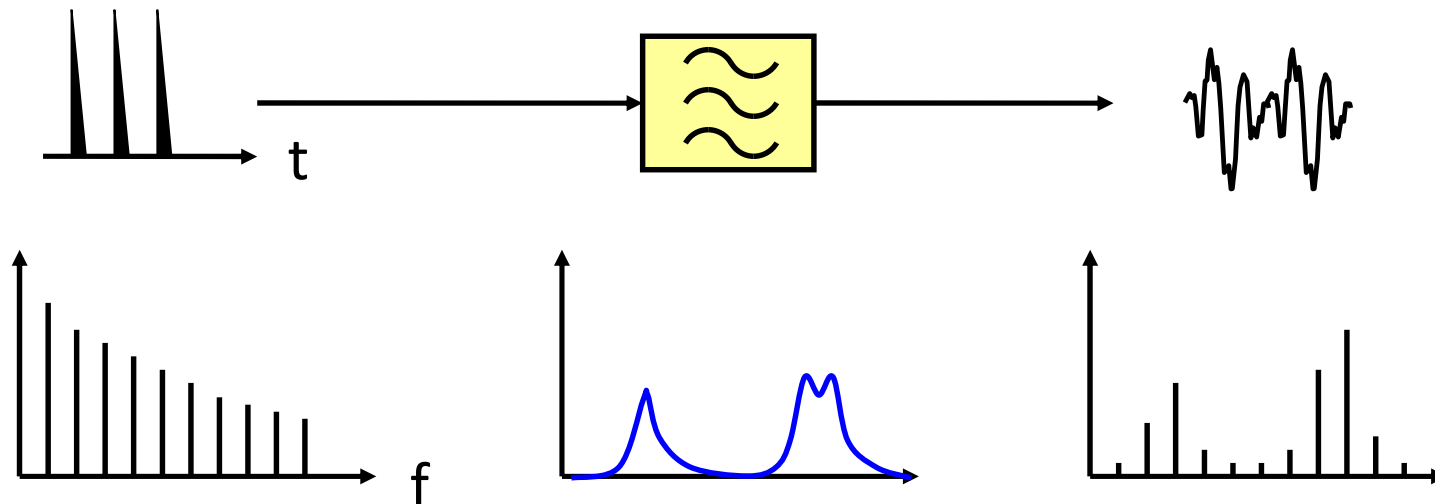


# A Voz Humana e o Vocoder

# A Voz Humana



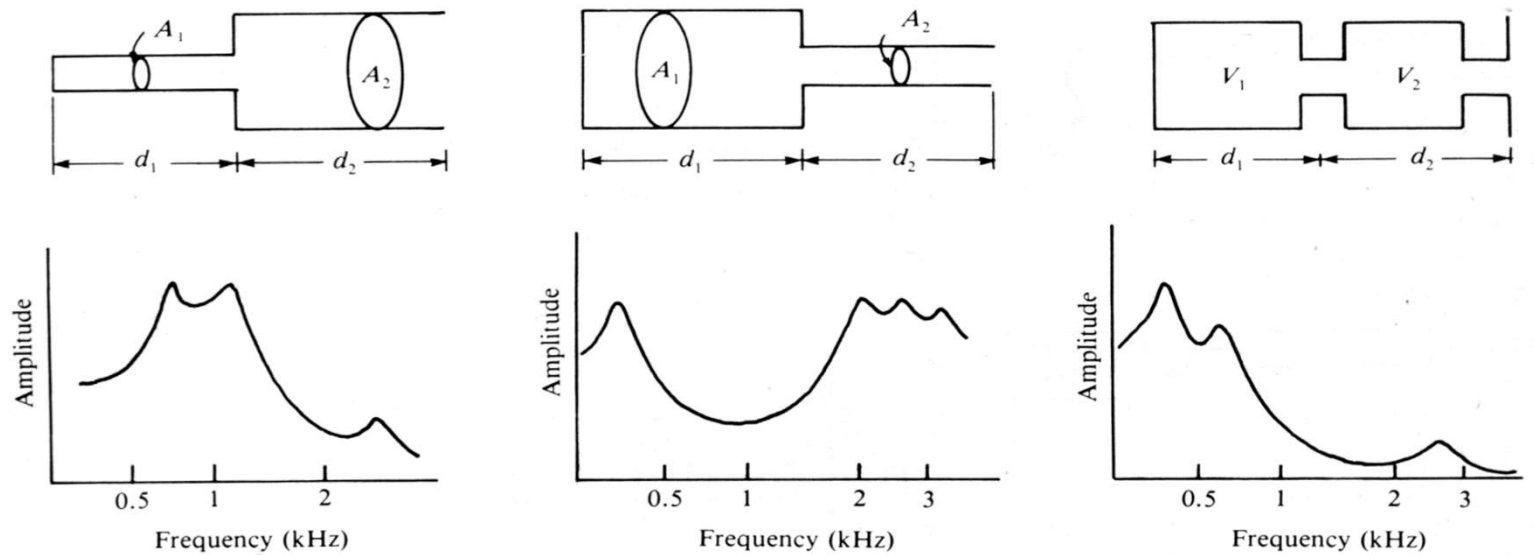
# Características Espectrais da Voz



Fundamental:  
100-150 Hz (M)  
200-300 Hz (F)

Formantes:  
250-800 Hz (1)  
800-2300 Hz (2)  
2200-3000 Hz (3)

# Características das Formantes Espectrais

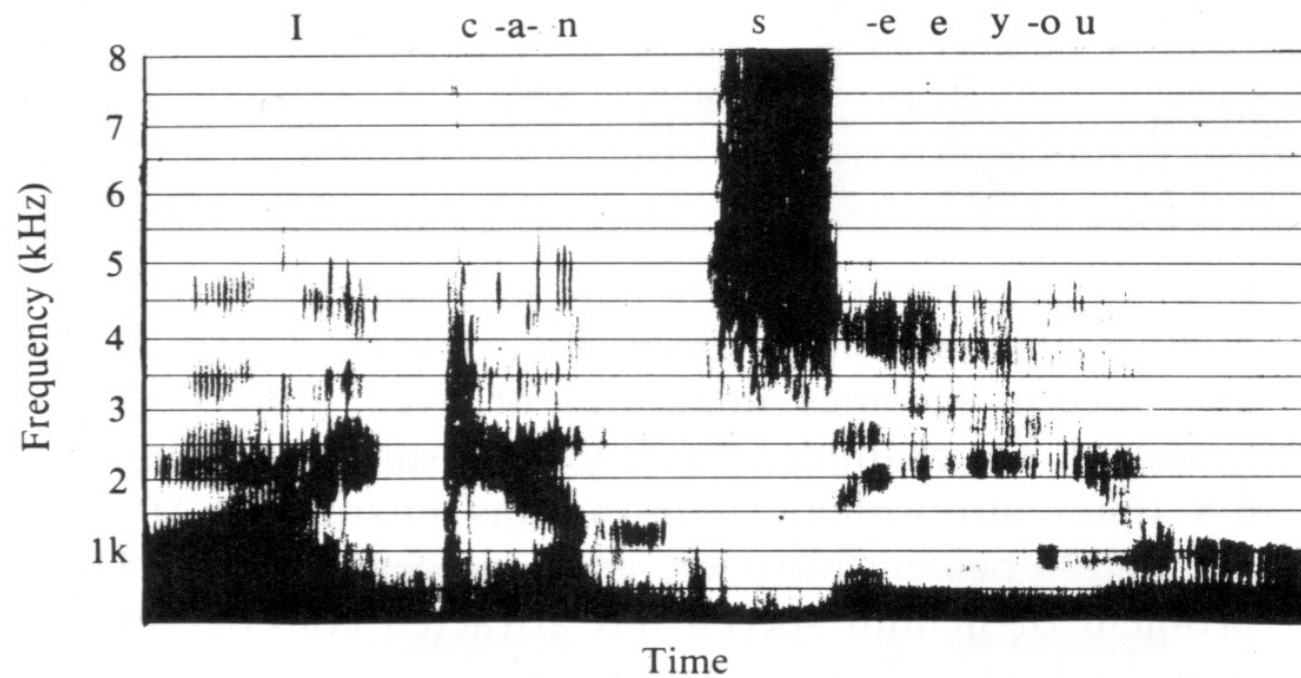


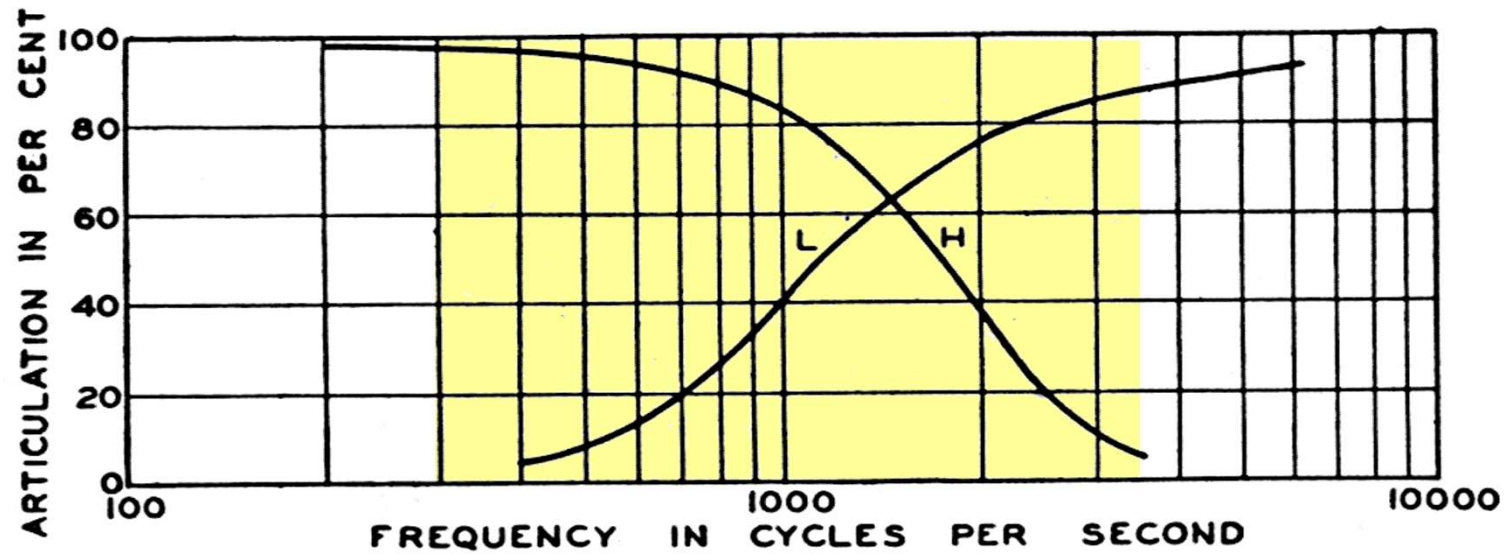
“a”

“i”

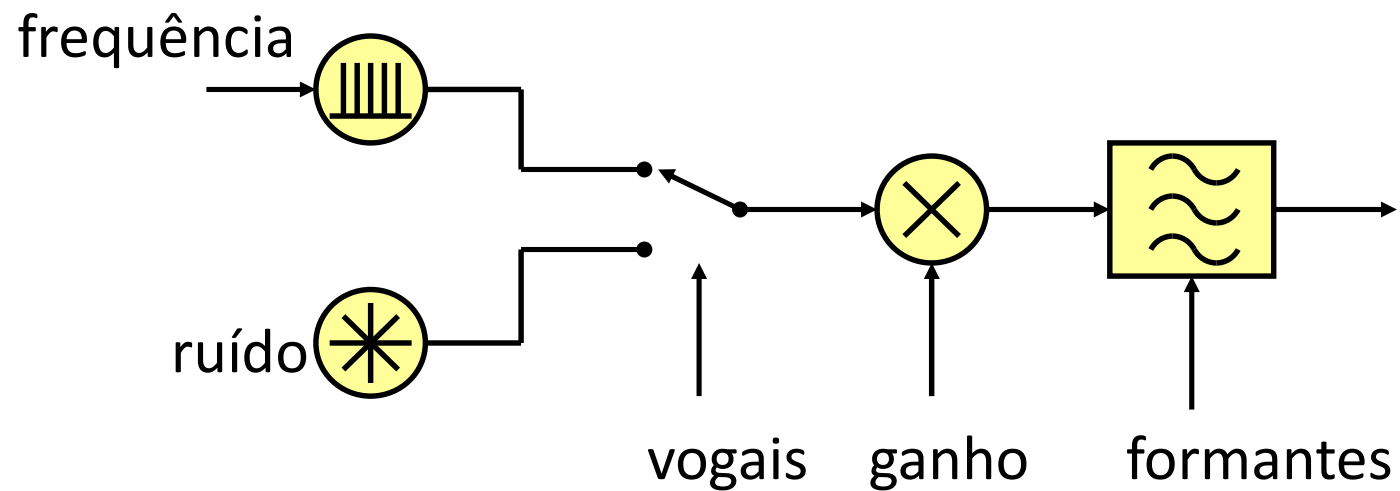
“u”

# Espectrograma (Tempo / Frequência) da Voz





# Síntese de Voz (Vocoder)



- PCM 16 bits, 44.1 kHz, estéreo:
  - 85 Mbits
- MPEG-1 Nível 3 (MP3) a 128 kb/s:
  - 8 Mbits
- LPC (Linear Predictive Coding - voz):
  - 400 kbits
- MIDI (Musical Instruments Digital Interface):
  - 250 kbits típico

# Modelamento de Sistemas Dinâmicos

- Modelo Elétrico de um Sistema Mecânico
  - Corrente  $\Leftrightarrow$  velocidade
  - Tensão  $\Leftrightarrow$  força
  - Carga  $\Leftrightarrow$  Deslocamento
  - Resistência  $\Leftrightarrow$  Atrito Viscoso
  - Indutância  $\Leftrightarrow$  Massa
  - Capacitância  $\Leftrightarrow$  Compliância (Elasticidade<sup>-1</sup>)

- Indutância

$$e = L \frac{di}{dt}$$

- Capacitância

$$v = \frac{q}{C} = \frac{1}{C} \int i \, dt$$

- Resistência

$$e = R \times i$$

- Massa

$$f = M \frac{dv}{dt}$$

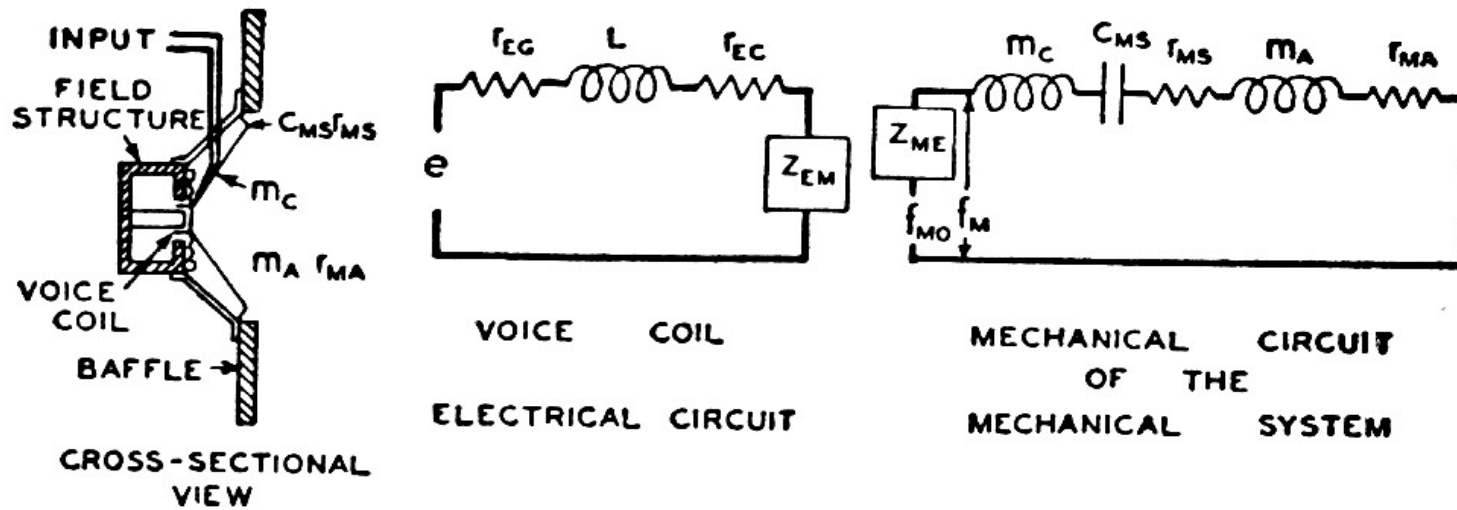
- Compliância

$$f = \frac{x}{C_M} = \frac{1}{C_M} \int v \, dt$$

- Viscosidade

$$f = R_M \times v$$

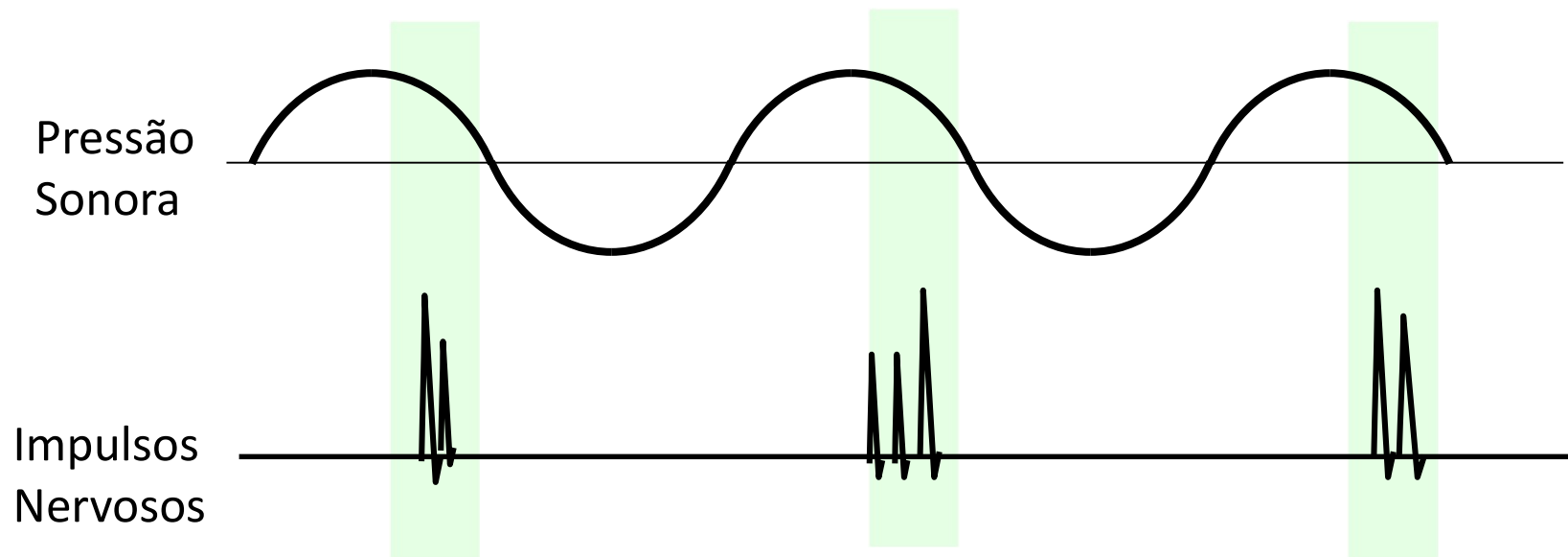
# Modelo de um Alto-Falante



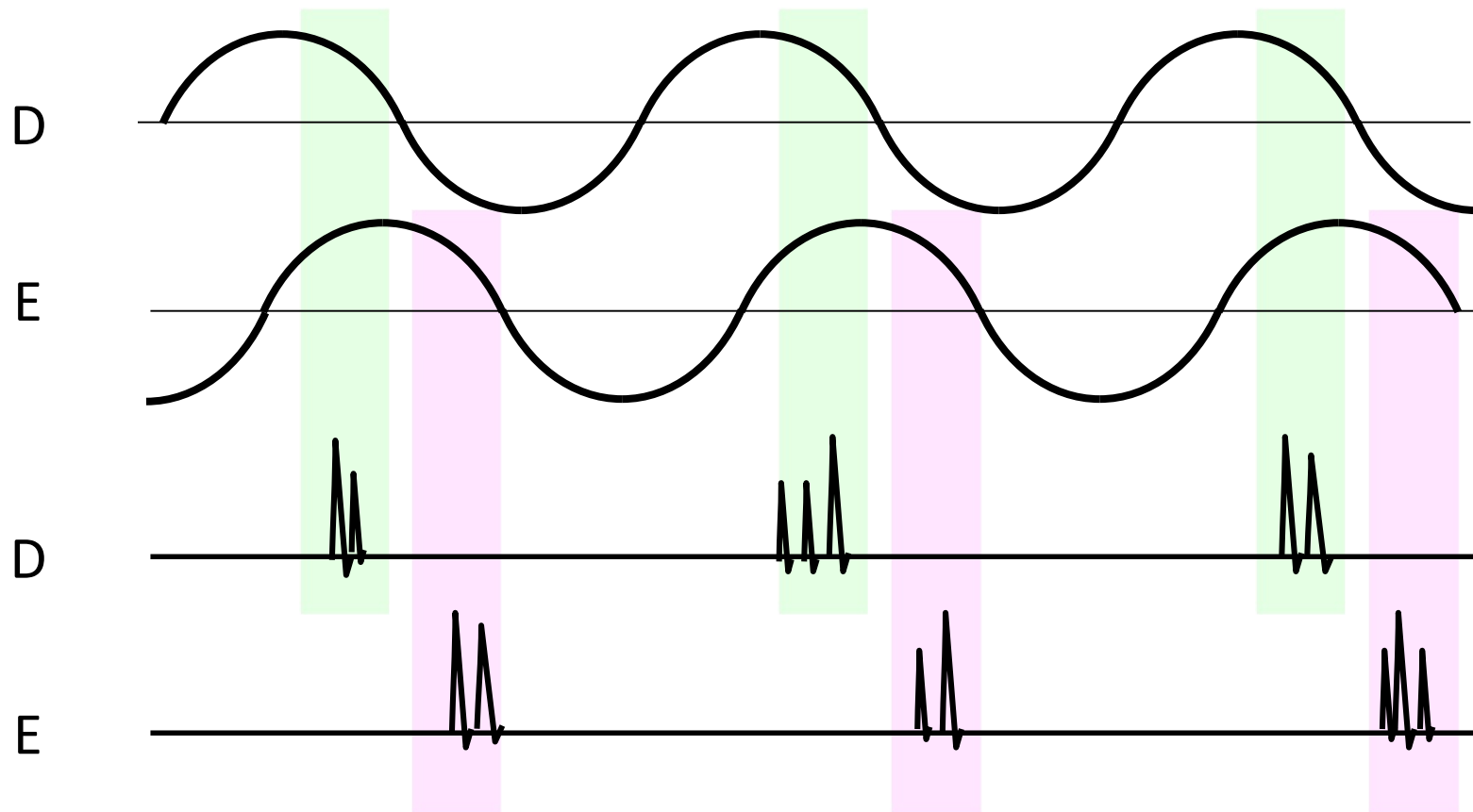
# Questões Polêmicas

- Audibilidade de Fase
- Audibilidade Ultrassônica
- Falhas na Caracterização
- Sutilezas

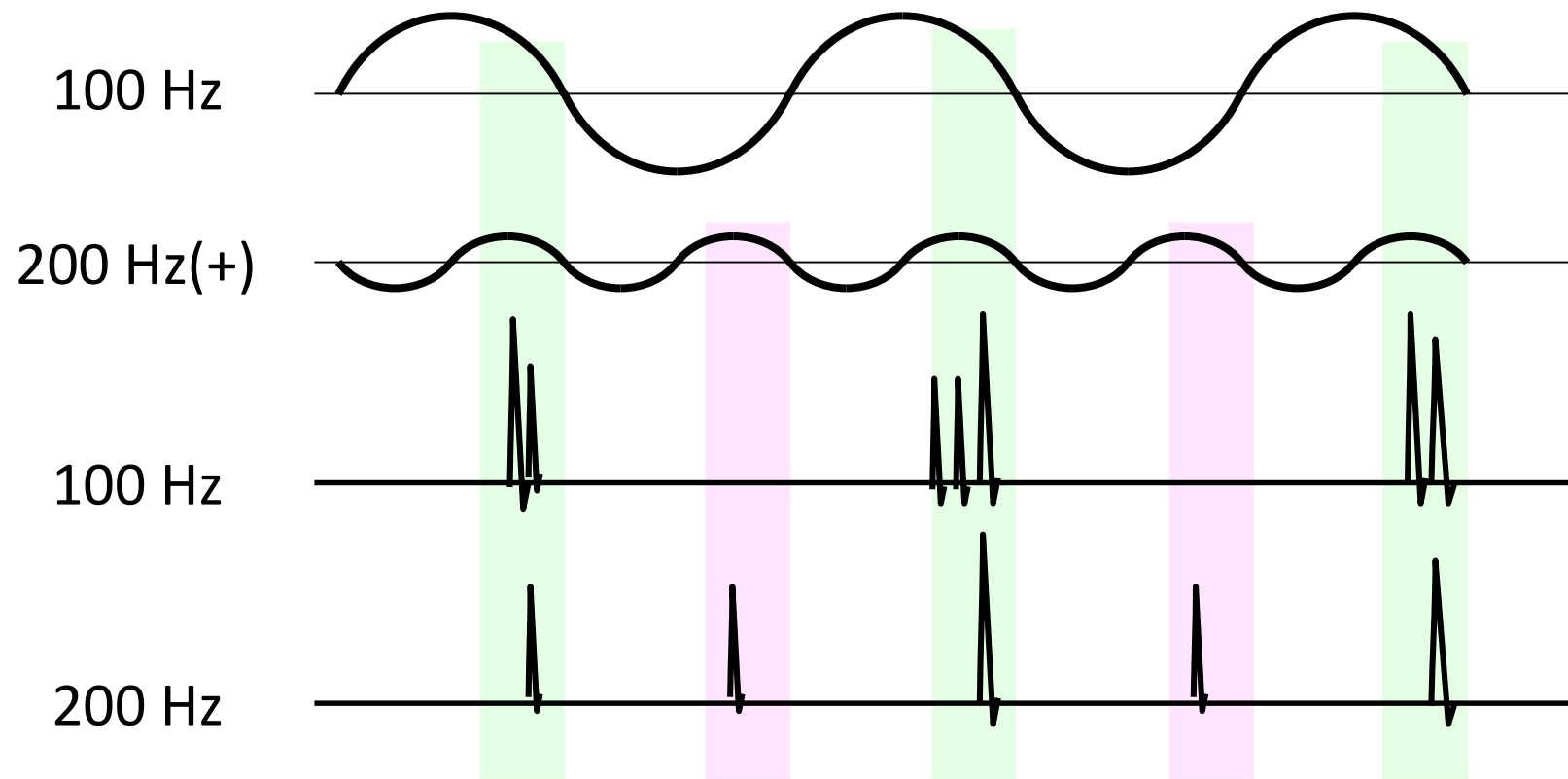
# Audibilidade de Fase



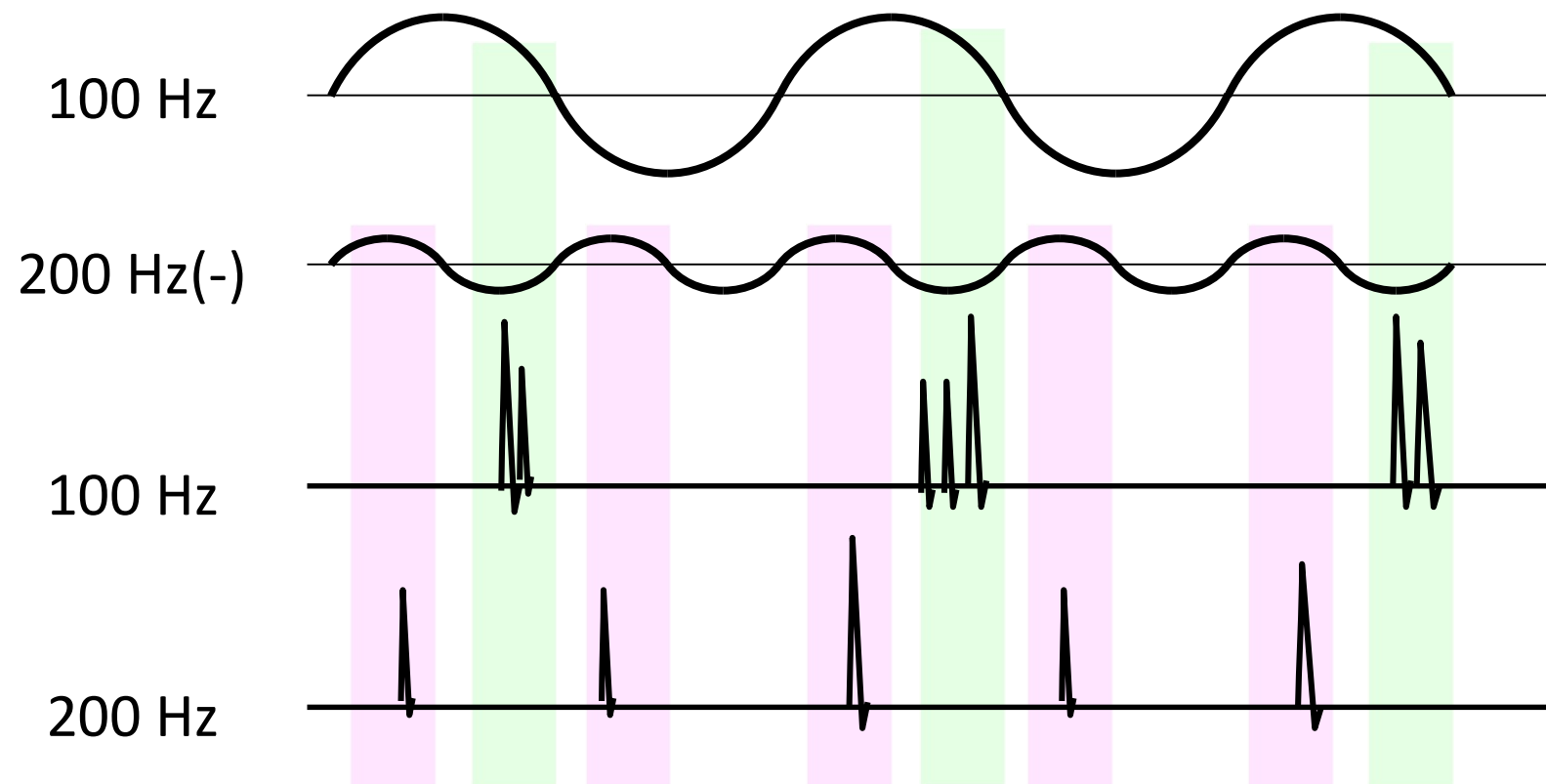
# Determinação de Direção pela Defasagem



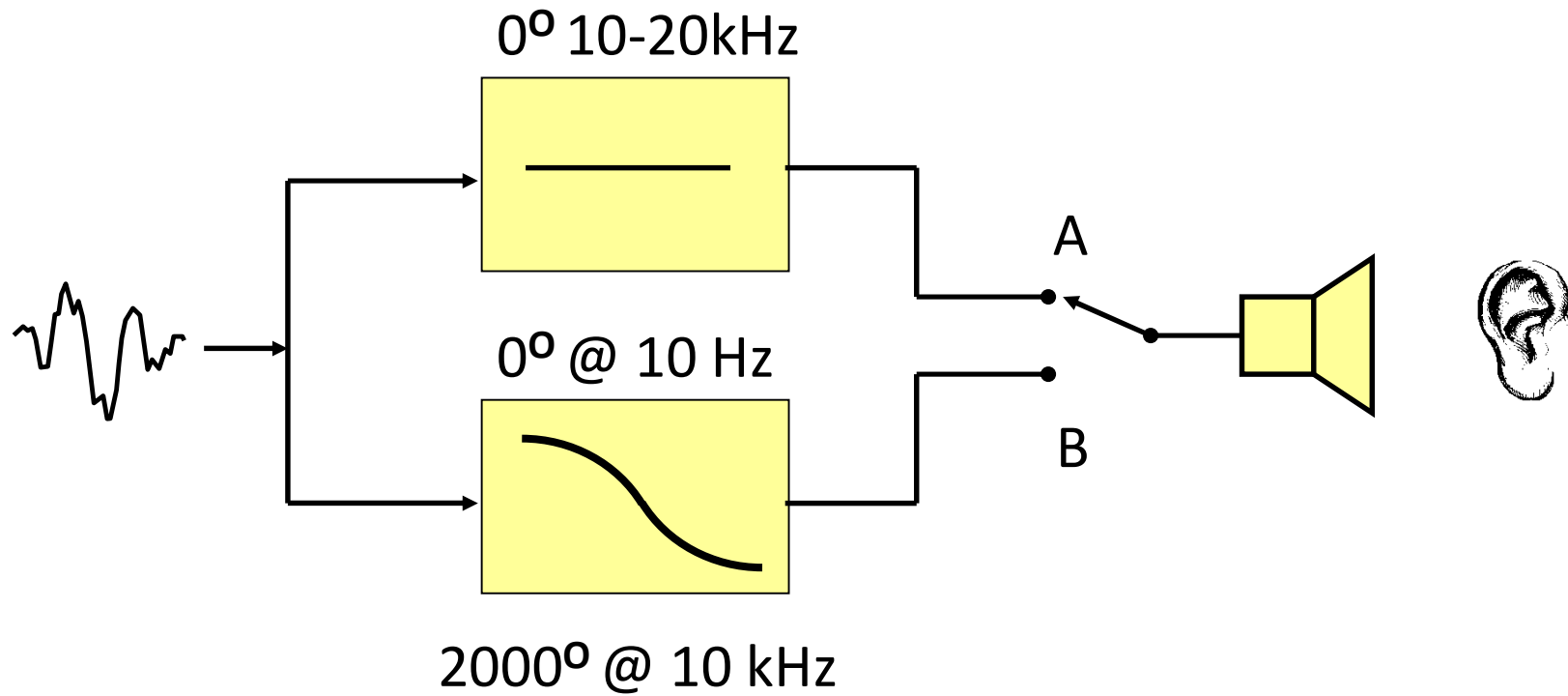
# Fase Relativa de Harmônicas



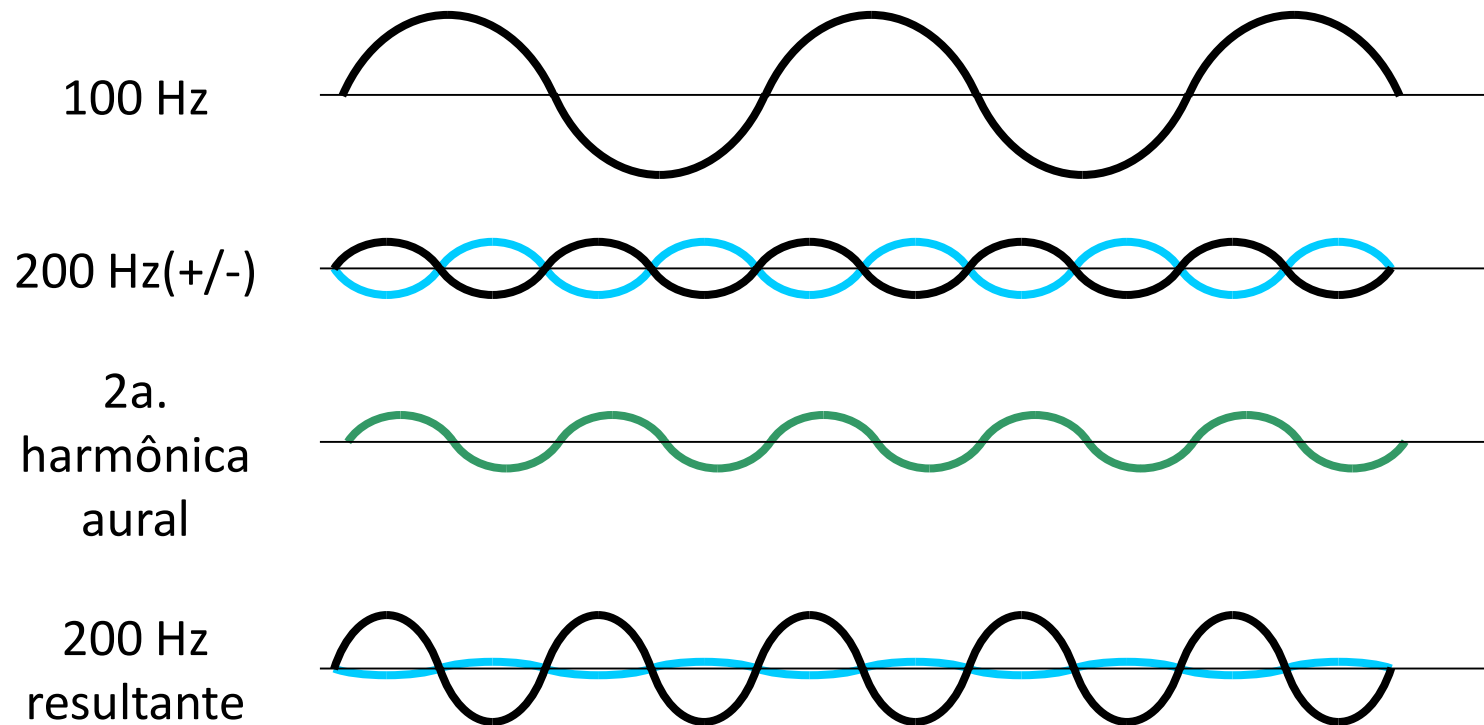
# Fase Relativa de Harmônicas



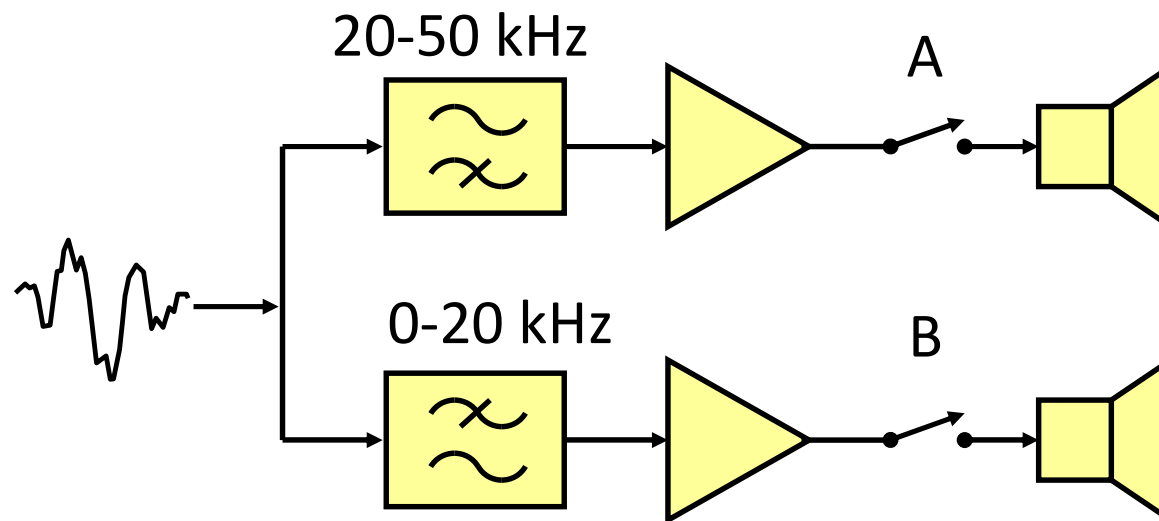
# Experimento: Audibilidade de Fase



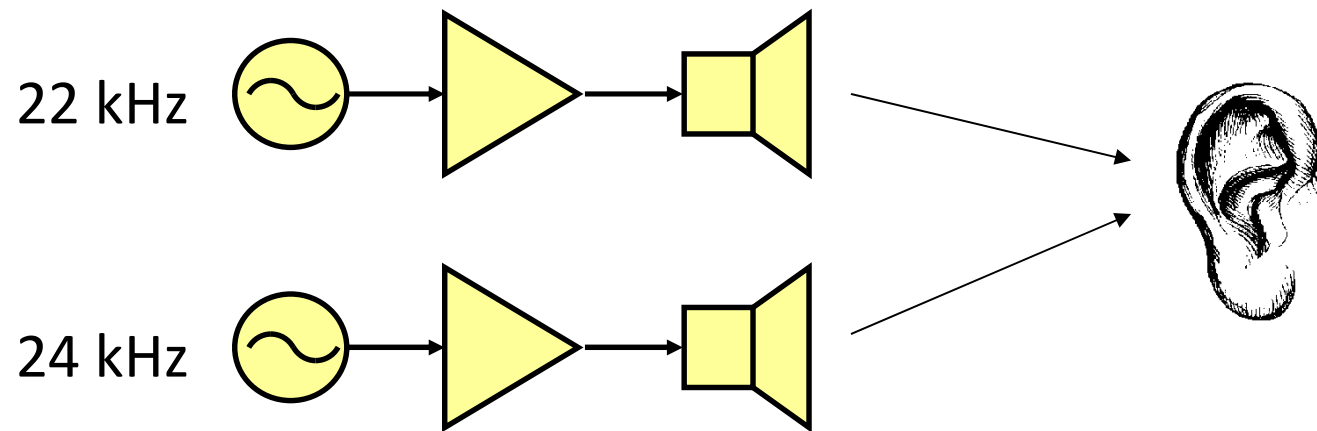
# Condições de Audibilidade de Fase



# Experimento: Audibilidade Ultrassônica



# Condições de Audibilidade Ultrassônica

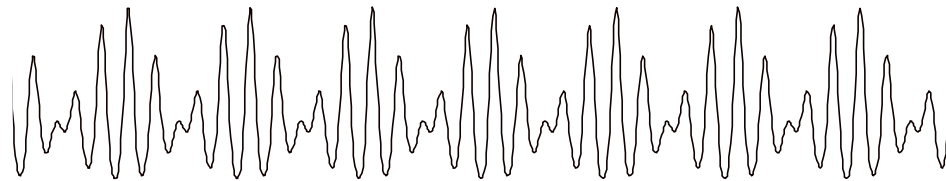


# Audibilidade Ultrassônica: Distorção Aural

22 kHz  
+  
24 kHz



Após  
distorção  
aural



2 kHz  
audível

