

# Multimédia

## Fundamentos de Multimédia: Áudio Digital

Prof. Dr. Rui Pedro Paiva

---



# Sumário

---

- ◆ Bibliografia
- ◆ Som e Áudio
- ◆ Audição Humana
- ◆ Representação Computacional de Áudio



# Bibliografia

---

- ◆ Li et al (2014). “Fundamentals of Multimedia”, Springer.

# Som e Áudio

## ◆ Som

- **Fenómeno físico** causado pela **vibração da matéria** (e.g., corda de guitarra, lápis a cair no chão)

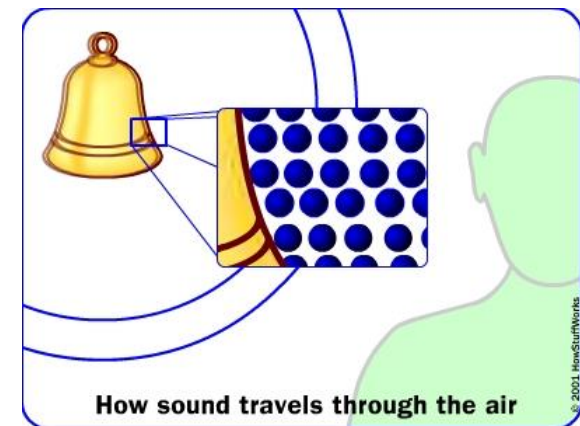
## ◆ Áudio

- **Som audível** pelo ser humano
- Frequências de som detectáveis pelo ouvido humano (jovem e saudável): **20Hz a 20 kHz** (música, voz, ruído, ...)

# Som e Áudio

## ◆ Formação do som

- A vibração da matéria provoca alterações de pressão no ar que rodeia o objecto em causa
- Estas alterações de pressão são propagadas no ar em movimentos ondulatórios



# Som e Áudio

## ◆ Formação do som (cont.)

### ■ **Onda mecânica**

- ◆ Necessita de um meio para se propagar (não pode propagar-se no vazio)

### ■ **Onda longitudinal**

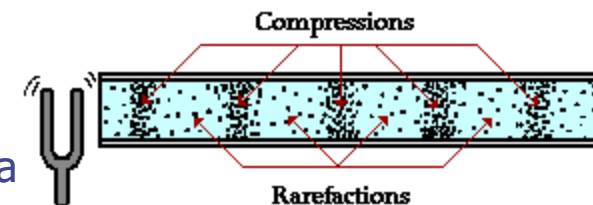
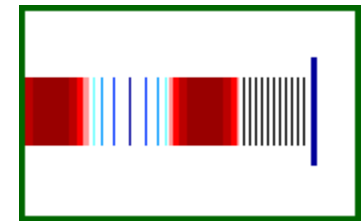
- ◆ Direcção da oscilação = direcção de propagação
- Quando uma onda sonora na gama do áudio atinge o ouvido humano, o som é percebido

# Som e Áudio

## ◆ Propagação do som

### ■ Mecanismo de **interacção de partículas**

- ◆ Vibração de objecto causa movimento das partículas à sua volta
- ◆ As partículas de ar em vibração causam, por sua vez, a vibração das partículas à sua volta → propagação da vibração no espaço
- ◆ Movimento de “aproximação” do objecto:
  - Empurra as partículas de ar circundante
  - Partículas colidem com as partículas à sua frente, e assim por diante → zonas de compressão de ar (i.e., pressão alta)
- ◆ Movimento de “afastamento” do objecto:
  - Zona de rarefacção criada (i.e., pressão baixa) → partículas comprimidas encontra deslocam, em propagação



© <http://www.physicsclassroom.com/Class/sound/>



# Som e Áudio

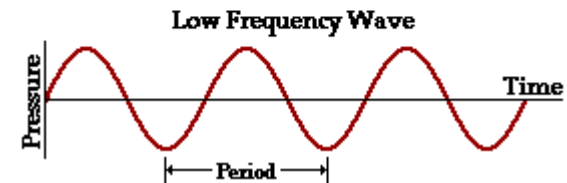
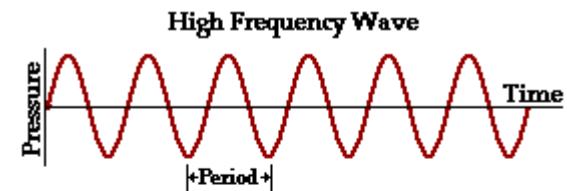
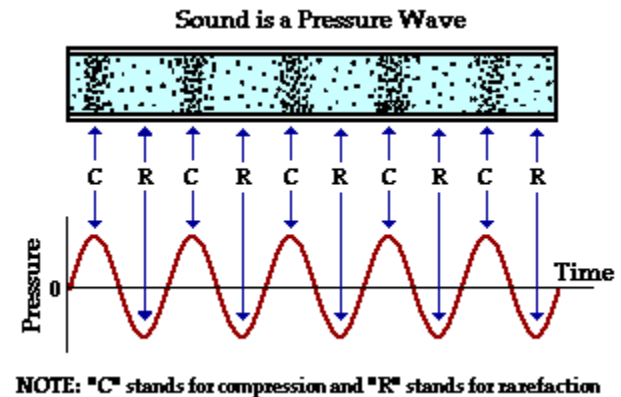
## ◆ Características das ondas sonoras

### ■ Comprimento de onda ( $\lambda$ )

- ◆ Distância entre duas zonas sucessivas de compressão

### ■ Frequência

- ◆ Número de oscilações por segundo (mede-se em Hz); inverso do período (intervalo de repetição)
- ◆ Inversamente proporcional ao comprimento de onda
- ◆ Objectos têm frequências naturais de vibração
- ◆ Variações interpretadas como variações da altura do tom



© <http://www.physicsclassroom.com/Class/sound/>

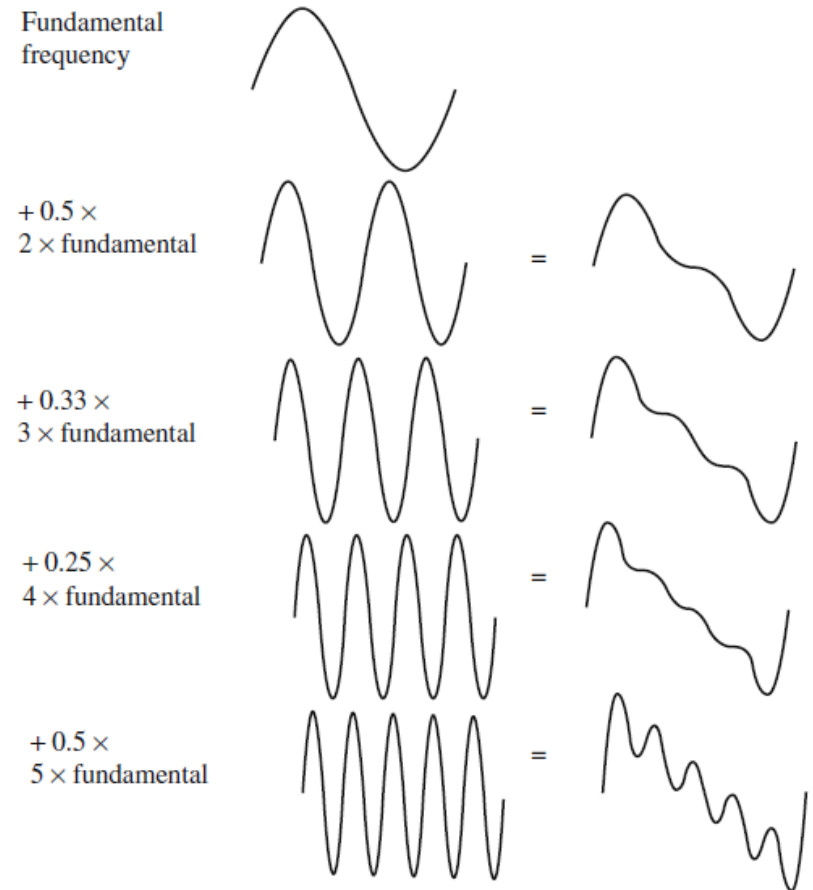


# Som e Áudio

## ◆ Características das ondas sonoras (cont.)

### ■ Frequência (cont.)

- ◆ Qualquer sinal pode ser decomposto por um somatório de sinusoidais (infinito, se necessário)
  - Parciais: Frequência Fundamental ( $F_0$ ) + overtones (múltiplos inteiros e não inteiros de  $F_0$ )
  - Harmónicos: múltiplos inteiros (parciais harmónicos)



© Ze-Nian Li 2014, p. 141

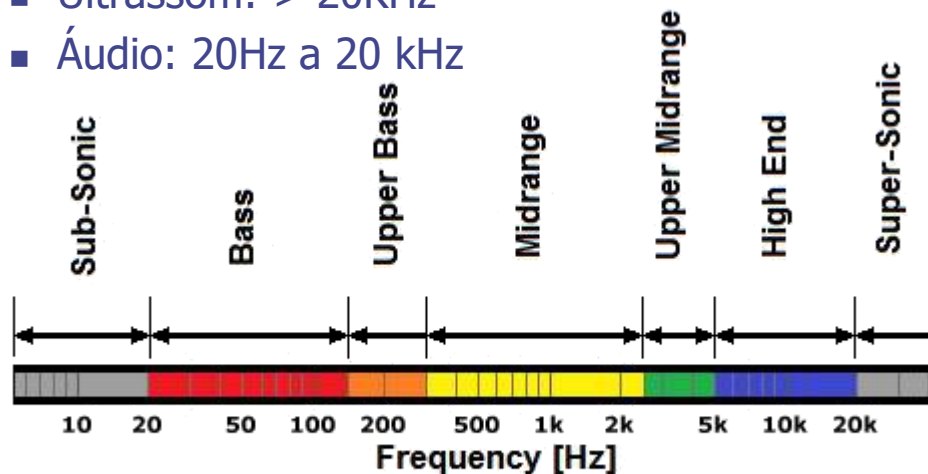
# Som e Áudio

## ◆ Características das ondas sonoras (cont.)

### ■ Frequência (cont.)

#### ◆ Espectro do som

- Infrassom:  $< 20\text{Hz}$
- Ultrassom:  $> 20\text{KHz}$
- Áudio:  $20\text{Hz}$  a  $20\text{ kHz}$



© <https://noji.com/hamradio/glossary.php>

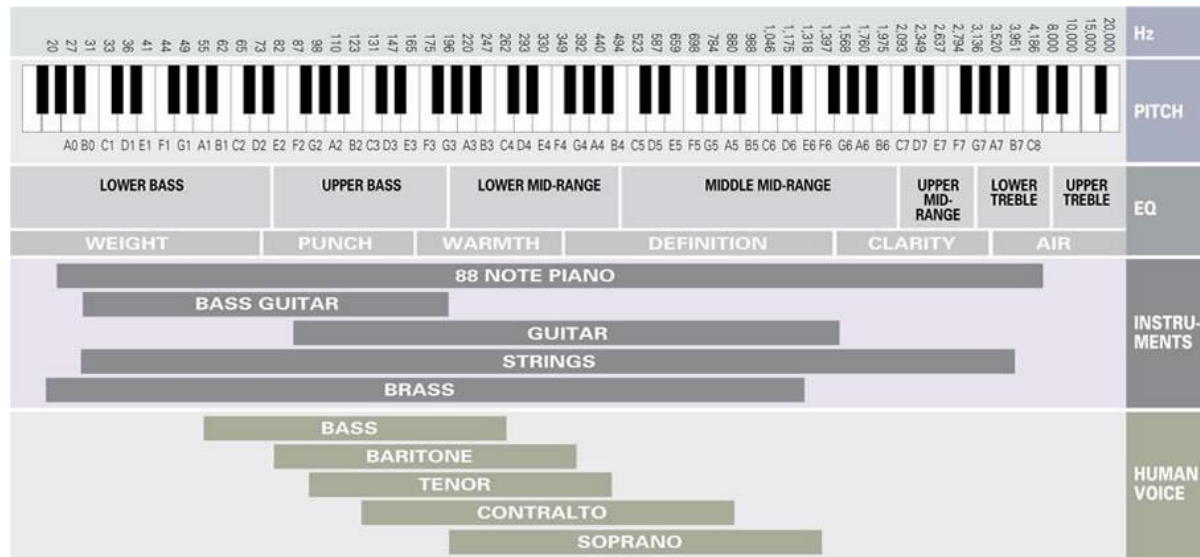
# Som e Áudio

## ◆ Características das ondas sonoras (cont.)

### ■ Frequência (cont.)

#### ◆ Espectro do áudio

- Gama de frequências de som detectáveis pelo ouvido humano: corresponde aproximadamente a frequências de som entre **20 Hz** e **20 kHz**



# Som e Áudio

## ◆ Características das ondas sonoras (cont.)

### ■ Frequência (cont.)

#### ◆ Espectro do áudio

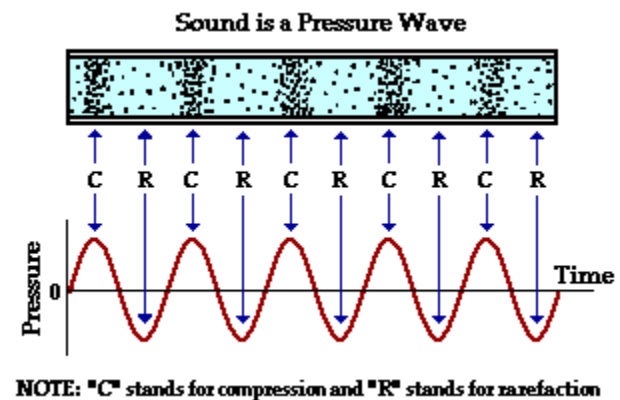
- Voz humana:  $\sim 125\text{Hz}$  até  $\sim 8\text{kHz}$  → região onde o ouvido humano é mais sensível
  - Frequência fundamental ( $F_0$ ) homem: 85 - 180Hz
  - $F_0$  mulher: 165 – 255 Hz

# Som e Áudio

## ◆ Características das ondas sonoras (cont.)

### ■ Amplitude

- ◆ Som: sinal **unidimensional**
  - Amplitude varia ao longo do tempo
  - (Imagem: sinal 2D; Vídeo: sinal 3D)
- ◆ Medida do deslocamento da onda sonora relativamente ao seu valor médio
- ◆ Mais energia  $\Rightarrow$  mais partículas em vibração (no mesmo  $\lambda$ )  $\Rightarrow$  maior compressão  $\Rightarrow$  pressão mais alta



# Som e Áudio

## ◆ Características das ondas sonoras (cont.)

### ■ **Intensidade**

- ◆ Quantidade de energia transportada por unidade de área e por unidade de tempo

$$Intensidade = \frac{Energia}{Tempo \times \text{Área}} = \frac{Potência}{\text{Área}} \quad (W/m^2)$$

### ◆ **Limiar da audição (LDA)**

- $I = 10^{-12} \text{ W/m}^2 \Leftrightarrow P = 2 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2$  (deslocamento  $10^{-9} \text{ cm}$ )

# Som e Áudio

## ◆ Características das ondas sonoras (cont.)

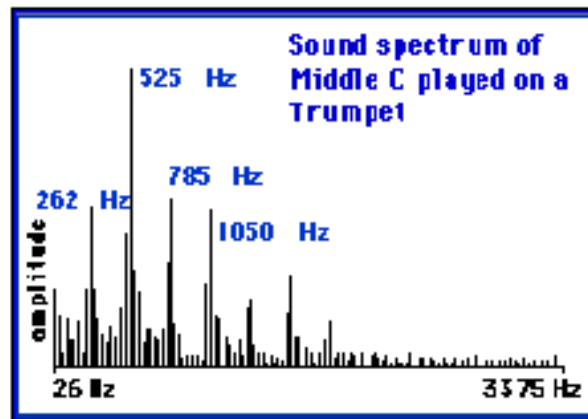
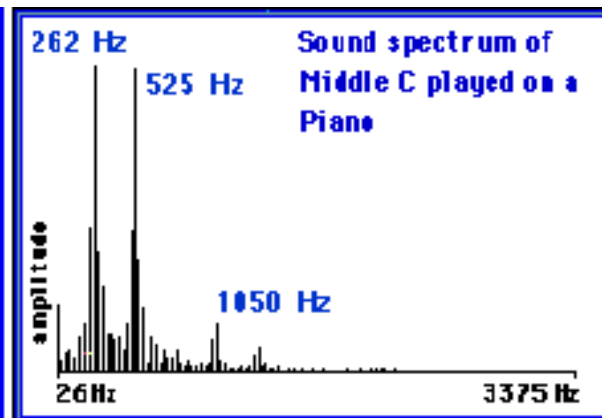
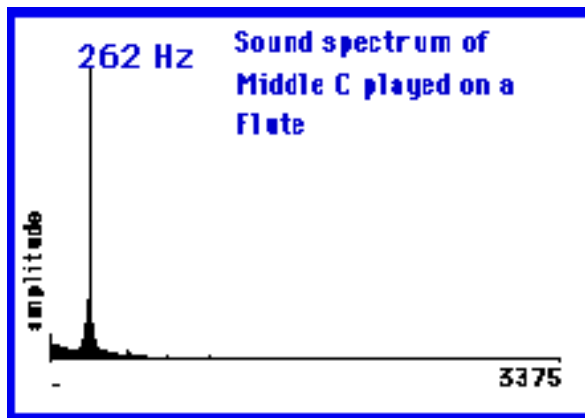
### ■ Intensidade (cont.)

- ◆ Som mais intenso audível: bilhões de vezes superior ao limiar da audição
  - Gama muito larga → utilizar escala logarítmica: escala de decibéis
- ◆ **Escala de decibéis**
  - Escala relativa: razão entre a intensidade em causa e intensidade do LDA numa escala logarítmica
$$\text{Intensidade} = 10 \log_{10} \frac{I}{I_{LDA}} \quad (dB)$$
  - Ouvido humano: pressão aumenta 10x, percepção de intensidade aumenta 2x
  - LDA = 0 dB
  - Conversa normal: 60 dB; Concertos rock: 110 dB
  - Limiar do desconforto: 120 dB; Limiar da Dor: = 140 dB
  - Perfuração instantânea do tímpano: 160 dB



# Som e Áudio

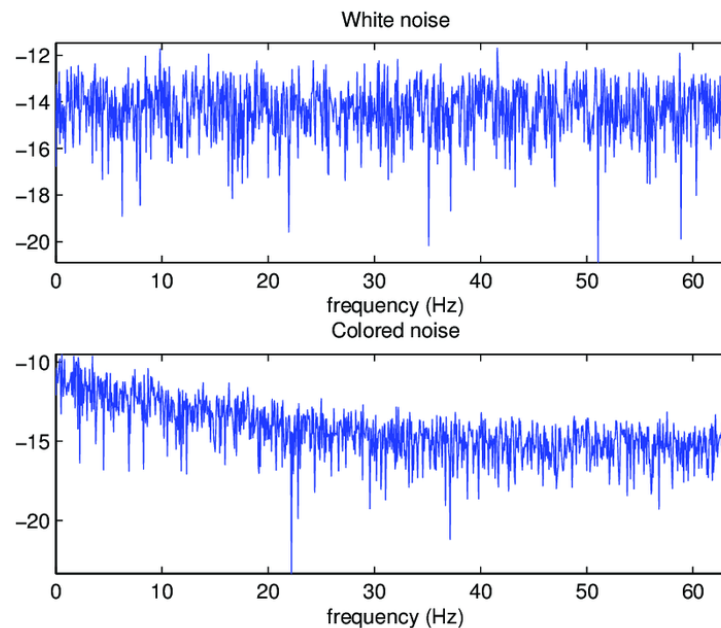
## ◆ Exemplos de espectros de potência: $I(\lambda)$ , $I(f)$



# Som e Áudio

## ◆ Ruído branco

- Mistura uniforme de todas frequências da gama do áudio
  - ◆ Amostras com amplitudes aleatórias no domínio temporal



© [https://www.researchgate.net/figure/Power-spectral-densities-of-white-noise-and-colored-noise\\_fig1\\_328591123](https://www.researchgate.net/figure/Power-spectral-densities-of-white-noise-and-colored-noise_fig1_328591123)

# Audição Humana

## ◆ Fisiologia

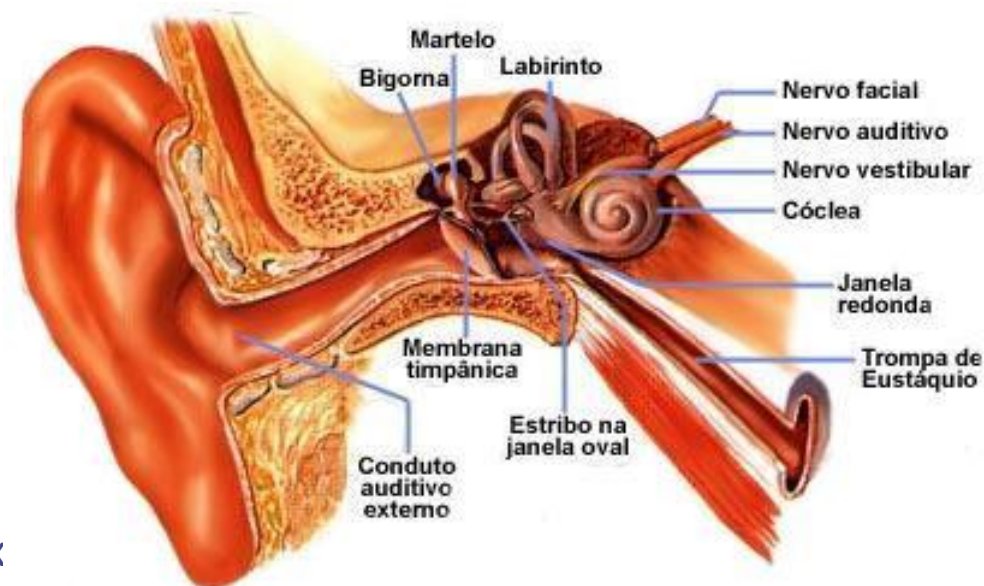
### ■ Ouvido humano

#### ◆ Amplificador

- Ouvido externo: 3x (canal auditivo)
- Ouvido médio:
  - Tímpano: 15x
  - Ossículos: 2, 3x

#### ◆ Transdutor

- Energia sonora → mecânica (ouvido médio: ossículos)
- Energia mecânica → onda de compressão (ossículos induzem vibração no fluido do ouvido interno)
- Onda de compressão → impulsos eléctricos conduzidos ao cérebro (ouvido interno: células nervosas da cóclea)

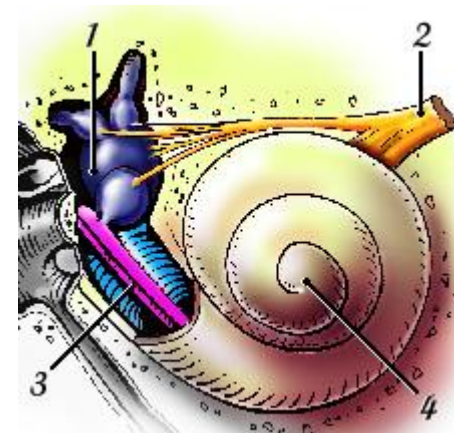


© <http://www.katembe2.com/enjoo.htm>

# Audição Humana

## ◆ Fisiologia (cont.)

- **Cóclea:** órgão do ouvido interno em forma de caracol responsável pela transformação da vibração do fluido no ouvido interno em impulsos nervosos
  - ◆ Dividida por duas membranas: a membrana de Reissner e a membrana basilar
  - ◆ Movimentos do estribo → vibrações propagadas ao líquido que enche a cóclea → vibrações na membrana basilar
  - ◆ Órgão de Corti (por cima da membrana basilar) aloja células sensorias designadas por células ciliadas, as quais convergem para fibras do nervo auditivo



### Legenda

1. Canais semicirculares
2. Nervo Auditivo
3. Membrana Basilar
4. Cóclea

©[http://telecom.inescn.pt/research/audiodio/cienciaviva/constituicao\\_audicao.html](http://telecom.inescn.pt/research/audiodio/cienciaviva/constituicao_audicao.html)

# Audição Humana

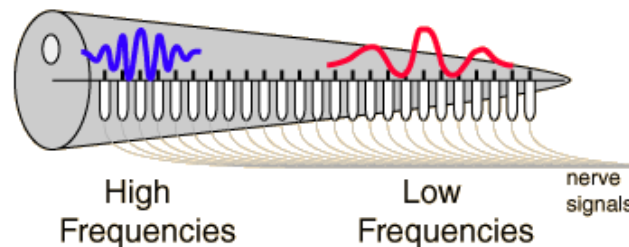
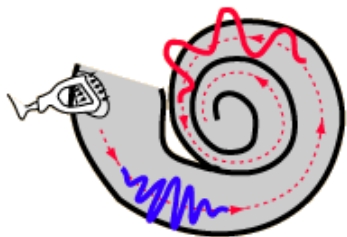
## ◆ Fisiologia (cont.)

### ■ Cóclea (cont.)

- ◆ Vibrações na membrana basilar → disparo das células ciliadas → propagação para o nervo auditivo → envio de informação para o cérebro

### ■ Detecção de frequência:

- ◆ Células ciliadas diferentes respondem a frequências diferentes (teoria do lugar)

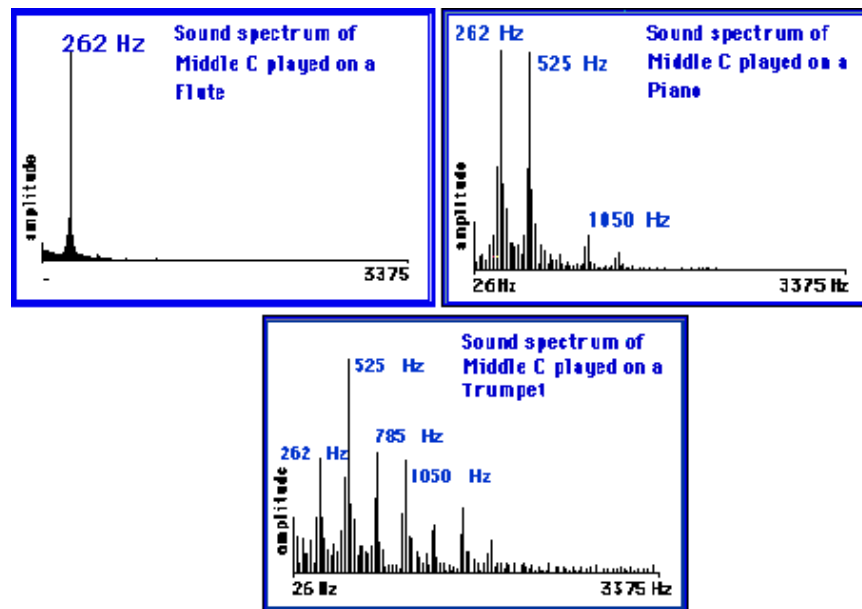
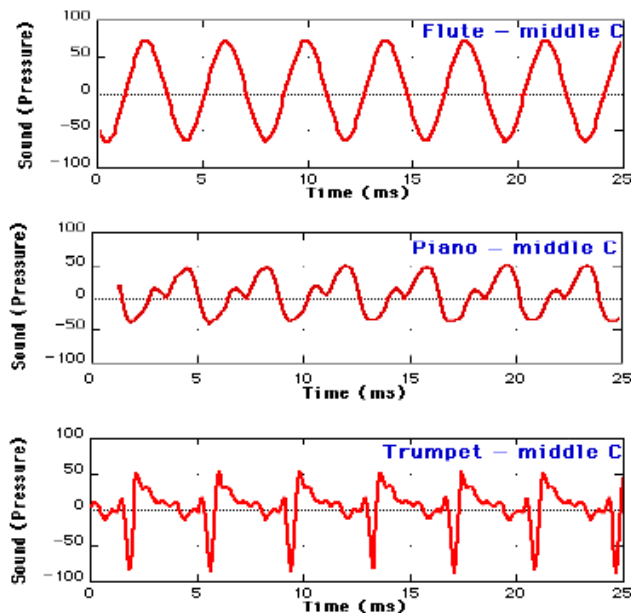




# Audição Humana

## ◆ Percepção de áudio

- Depende de aspectos físicos (sensoriais) e perceptuais
- **Aspectos físicos**
  - ◆ Componentes de frequência e intensidade do sinal áudio que chega ao ouvido



# Audição Humana

## ◆ Percepção de áudio (cont.)

### ■ Aspectos físicos

- ◆ **Loudness:** percepção de intensidade
  - Influenciado pela frequência do som
- ◆ **Pitch:** percepção de frequência
  - Influenciado pela intensidade do som

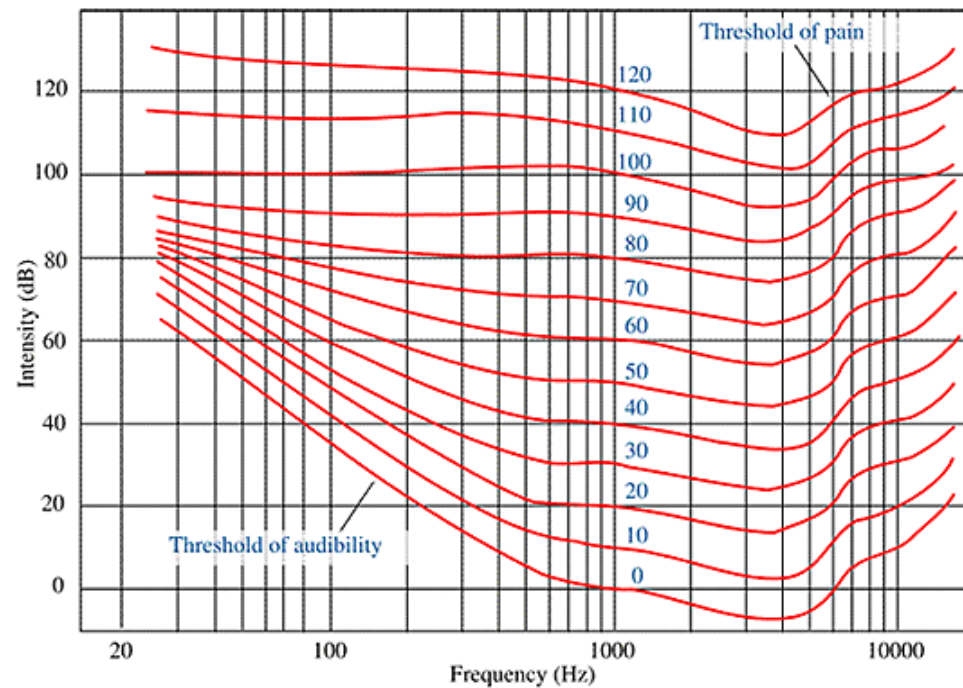


# Audição Humana

## ◆ Percepção de áudio (cont.)

### ■ Aspectos físicos (cont.)


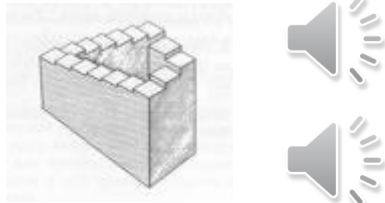
#### ◆ Fletcher-Munson's Equal Loudness Contours



# Audição Humana

## ◆ Percepção de áudio (cont.)

### ■ Aspectos perceptuais

- ◆ Contexto, expectativas, memória, etc...
  - Ilusões auditivas: contexto envolvente permite ouvir o que não está lá, e.g.,
    - Restauração auditiva 
    - Circularidade 
- ◆ Deficiências auditivas (anomalias a nível do ouvido ou do córtex cerebral)

# Audição Humana

## ◆ Estereoscopia

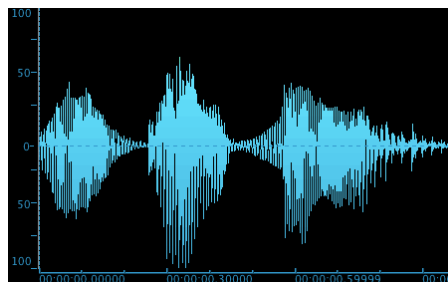
- Som estereoscópico = som com dois canais
  - ◆ Cinema e animação 3D
    - Baseado no princípio da audição estereoscópica
      - Cada ouvido recebe um som ligeiramente diferente
      - Da integração perceptual dos dois emerge a noção de localização 3D (dimensão de profundidade emerge)
- Audição
  - ◆ E.g., auscultadores stereo → um som para cada ouvido

# Representação Computacional de Áudio

## ◆ Tipos de som computacional

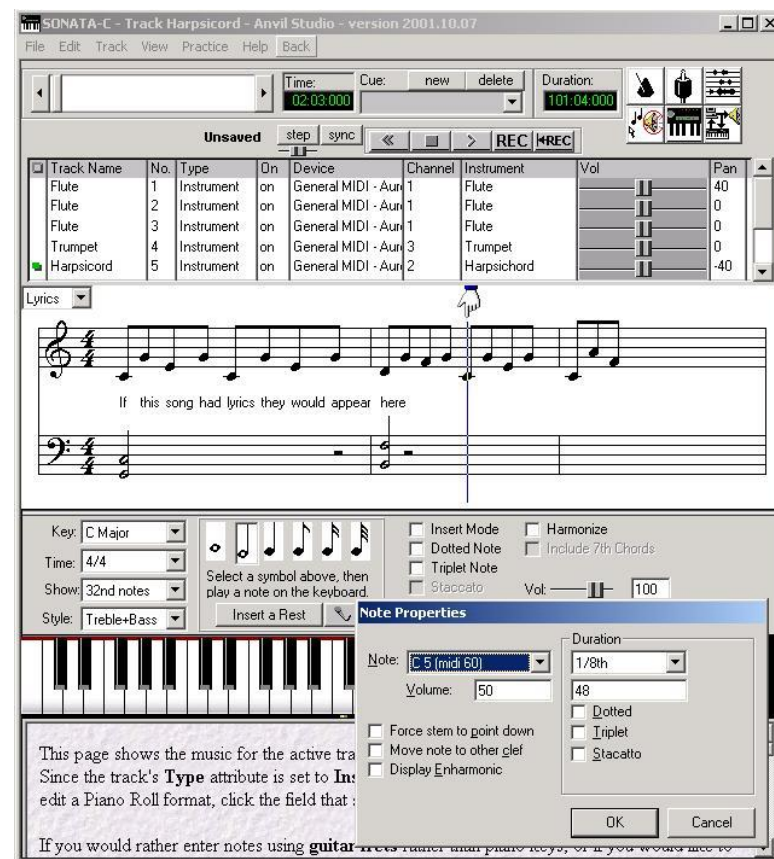
### ■ Áudio digital

- ◆ Som realista (e.g., música, fala, sons ambientais)
- ◆ Sons complexos, com requisitos elevados de detalhe



### ■ Som simbólico

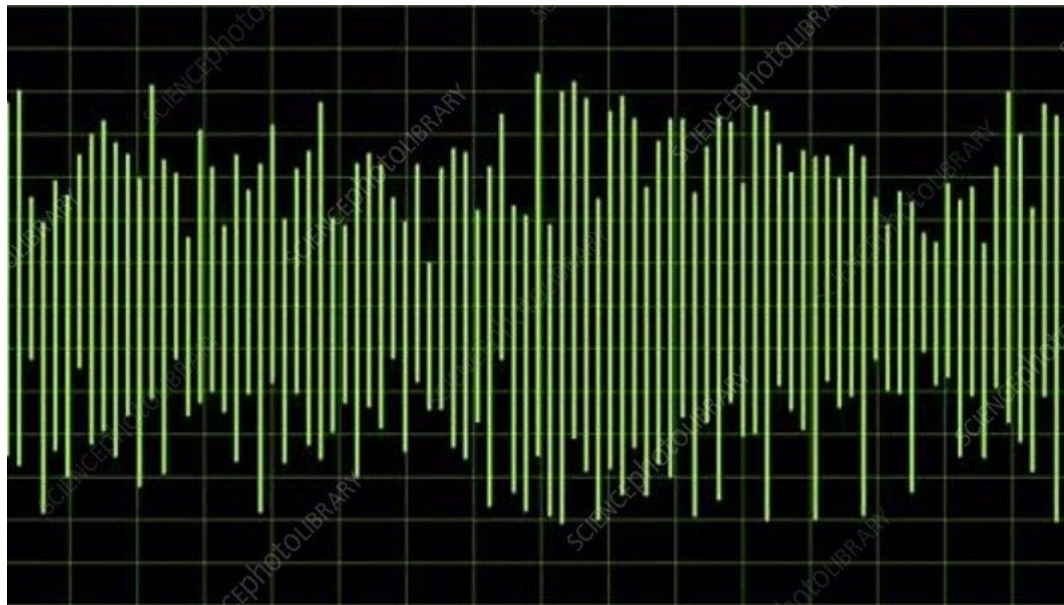
- ◆ E.g., MIDI (Musical Instrument Digital Interface)
  - Sons representáveis com base em comandos com assinatura temporal (e.g., nota, duração, instante, velocidade (intensidade), instrumento, ...)



# Representação Computacional de Áudio

## ◆ Áudio digital

- Áudio digital é, de forma simples, som analógico digitalizado, i.e., amostrado e quantizado



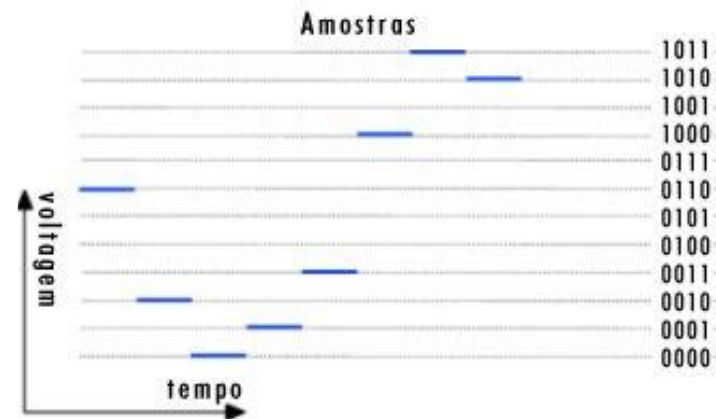
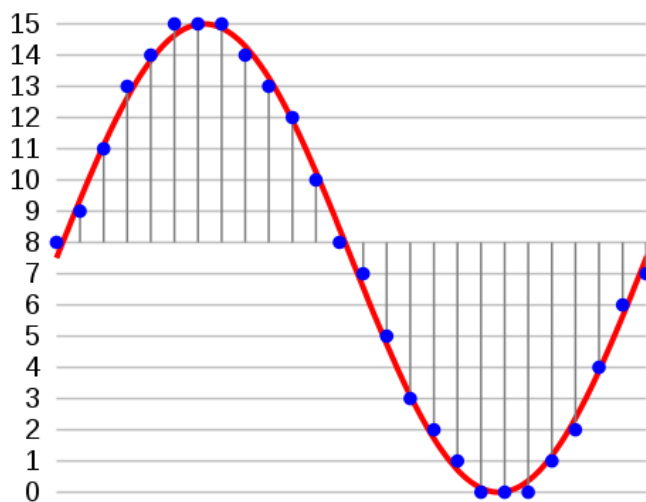
© <https://www.sciencephoto.com/media/901952/view/digital-audio-waveform>



# Representação Computacional de Áudio

## ◆ Áudio digital (cont.)

- Um computador não é capaz de representar directamente uma onda sonora
  - ◆ → Sinal áudio deve ser **amostrado no tempo** e **quantizado** (cada amostra representada digitalmente)



© [https://en.wikipedia.org/wiki/Pulse-code\\_modulation](https://en.wikipedia.org/wiki/Pulse-code_modulation)

# Representação Computacional de Áudio

## ◆ Áudio digital (cont.)

### ■ Representação

#### ◆ Codificação PCM (Pulse-Code Modulation, ver Secção. 1.1)

- Padrão básico de representação digital de sinais analógicos (sinais não-multimédia, em geral) em dispositivos digitais

#### ■ Amostragem

- Amplitude onda sonora (tensão eléctrica analógica dos sensores acústicos) é **amostrada** a intervalos de tempo uniformes

#### ■ Quantização

- Amostras são **quantizadas** para uma conjunto de valores num código digital (habitualmente binário)

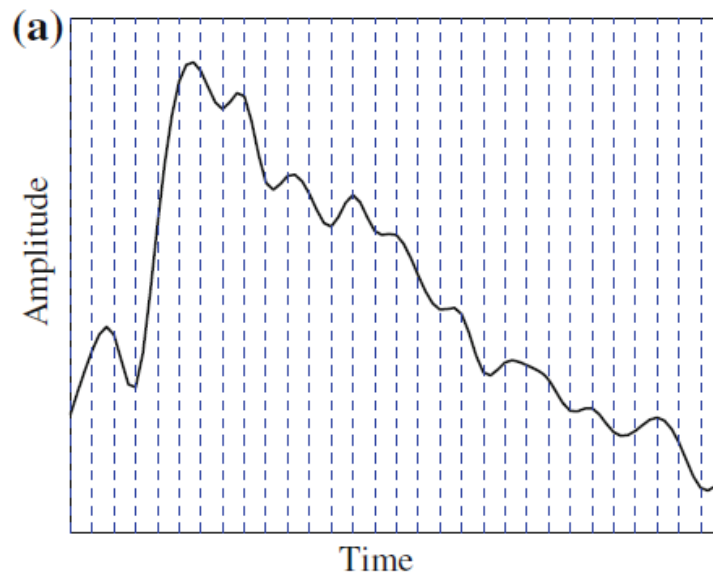


# Representação Computacional de Áudio

## ◆ Áudio digital (cont.)

### ■ Amostragem

- ◆ Recolha de medições (amostras) na **dimensão temporal** (tipicamente, intervalos regulares).
  - **ADC**: conversor analógico-digital
  - **DAC**: conversor digital-analógico
- ◆ **Frequência de amostragem,  $f_s$** 
  - Frequência a que a onda sonora é amostrada,
    - Tipicamente de **8 a 48 KHz**
    - Voz humana: até 8 kHz, mas info mais relevante até 4 kHz →  $f_s \geq 8$  kHz (16 KHz mínimo ideal)
    - Ouvido humano: até 20 KHz →  $f_s \geq 40$  kHz
  - Intervalo de amostragem: intervalo de tempo entre amostras (inverso da frequência de amostragem)



© Ze-Nian Li 2014, p. 142

# Representação Computacional de Áudio

## ◆ Áudio digital (cont.)

### ■ Amostragem (cont.)

- ◆ Que frequência (temporal) de amostragem , i.e., quantas amostras por unidade de tempo?

### ■ Teorema de Nyquist

- Se uma onda sonora contém componentes com uma frequência temporal máxima  $f_{max}$ , então a **frequência de amostragem deve ser maior que  $2f_{max}$**  por forma a reconstruir a onda sonora fielmente

$$f_s > 2f_{max}$$

- E.g., onda sonora com com frequência máxima de 5 kHz deve ser amostrado com frequência  $> 10$  kHz
- **$f_N$  = frequência de Nyquist =  $f_s / 2$**
- Alternativamente, poderá aplicar-se um filtro passa-baixo e amostrar a uma frequência mais baixa (***anti-alias filter***)

# Representação Computacional de Áudio

## ◆ Áudio digital (cont.)

### ■ Amostragem (cont.)

- ◆ Que frequência (temporal) de amostragem?

### ■ Teorema de Nyquist

#### ■ *Aliasing* temporal

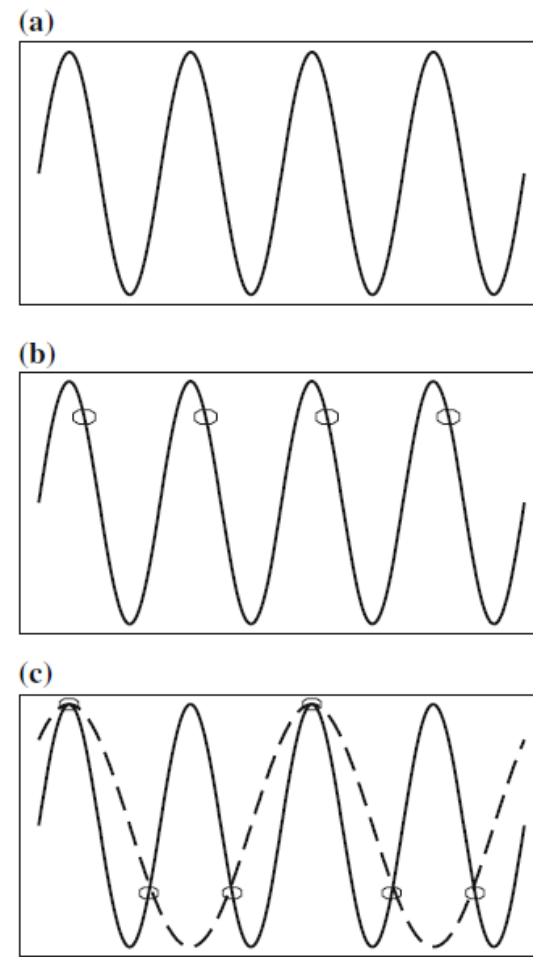
(a) Onda sonora

**Aliasing:**

(b)  $f_s = f_{\max} \rightarrow$  constante

(c)  $f_s = 1.5 f_{\max} \rightarrow$  falsa baixa frequência

$$f_{alias} = f_s - f_{true}, \text{ se } f_s \leq f_N$$



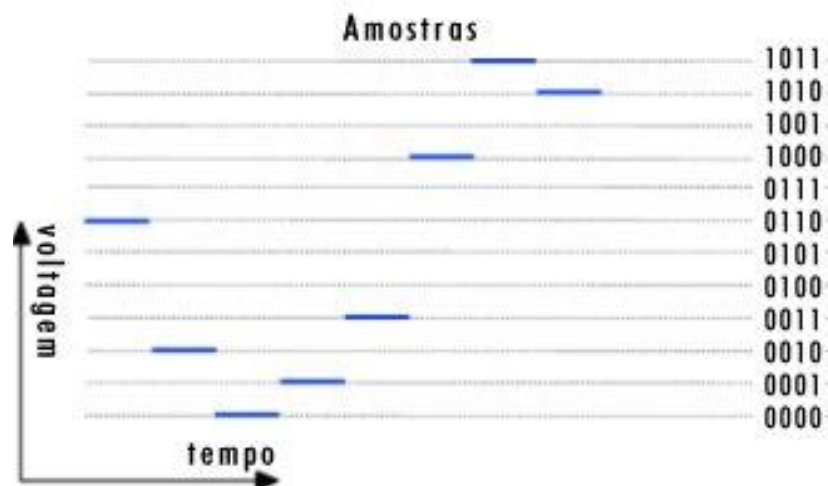
© Ze-Nian Li 2014, p. 143

# Representação Computacional de Áudio

## ◆ Áudio digital (cont.)

### ■ Quantização (Quantization)

- ◆ Amostragem na dimensão da **amplitude** (voltagem)
  - Processo de restrição de uma **fonte de informação contínua** (ou discreta, mas com gama larga de valores) para um **conjunto discreto** (e.g., valores inteiros)



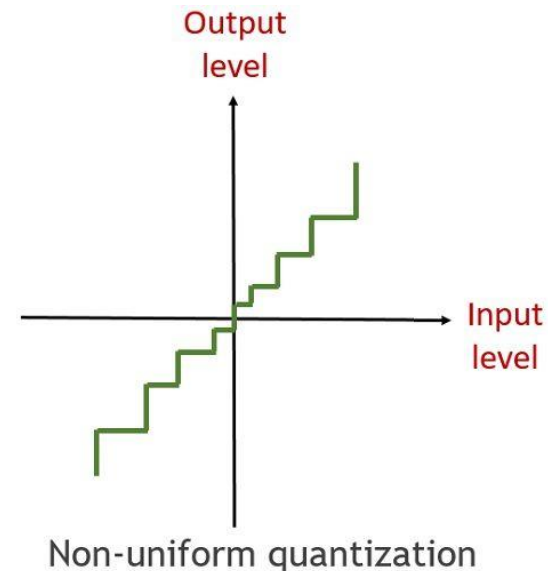
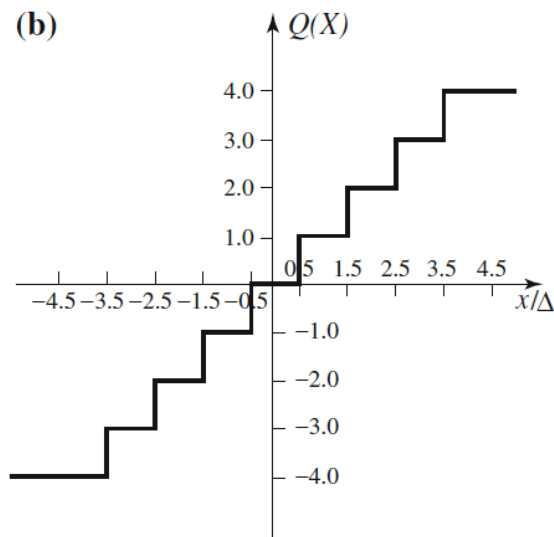
# Representação Computacional de Áudio

## ◆ Áudio digital (cont.)

### ■ Quantização (cont.)

- ◆ Quantização pode ser **uniforme** (intervalos iguais) ou **não uniforme** (intervalos desiguais)

- E.g.,  $\mu$ -law, mp3



Electronics Desk

# Representação Computacional de Áudio

## ◆ Áudio digital (cont.)

### ■ Quantização (cont.)

#### ◆ Intensidade de cada amostra

#### ■ De acordo com a **profundidade de bit de áudio (bit depth)**

#### ■ Nr. de bits por amostra

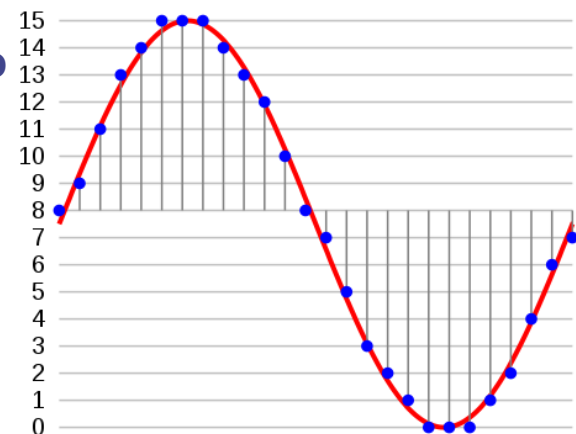
# Representação Computacional de Áudio

## ◆ Áudio digital (cont.)

### ■ Quantização (cont.)

#### ◆ Bit depth

- O número de valores que é possível representar depende do número de bits empregue na sua representação
  - Tipicamente: 8 ou 16 bits
- O valor de cada amostra é “arredondado” para o valor digital mais próximo
  - → **ruído (erro) de quantização**
  - 16 bits → cada amostra pode ter 65536 valores diferentes
  - → Maior fidelidade da representação digital obtida





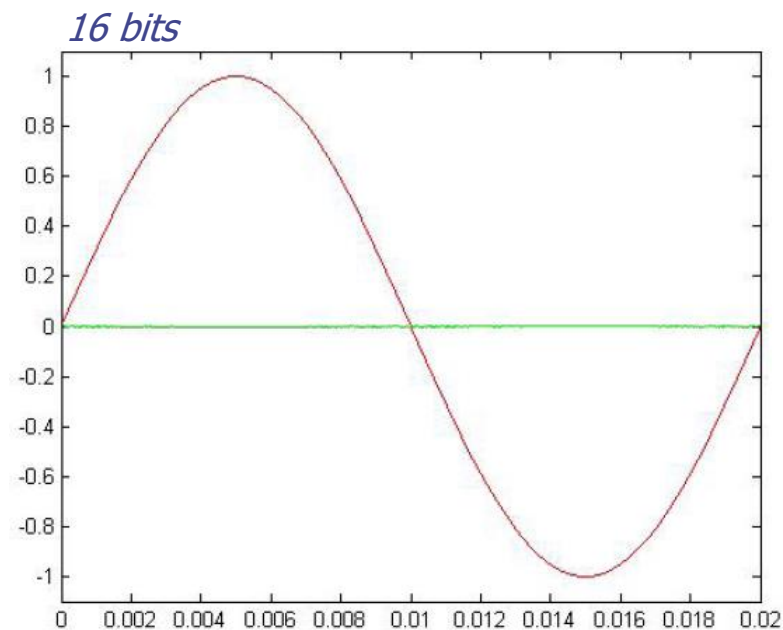
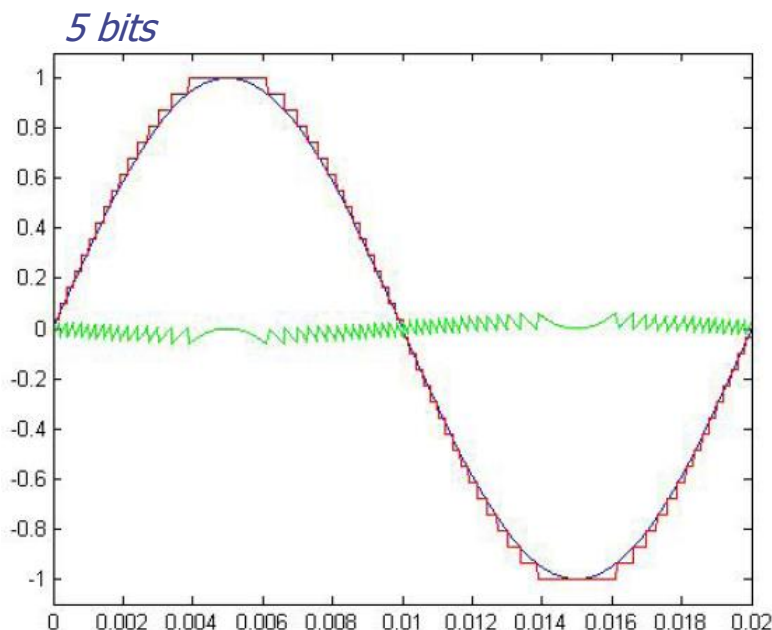
# Representação Computacional de Áudio

## ◆ Áudio digital (cont.)

### ■ Quantização (cont.)

#### ◆ Ruído (erro) de quantização

- Diferença entre os valores quantizados e os valores reais da onda



# Representação Computacional de Áudio

## ◆ Áudio digital (cont.)

### ■ Quantização (cont.)

#### ◆ Qualidade da quantização

##### ■ Signal-to-Quantization Noise Ratio (SQNR)

- Relação entre o sinal original e o erro de quantização → Rácio entre a potência do sinal e o ruído de quantização
- Tipicamente medido em **decibéis** (dB): escala logarítmica → compressão da gama

$$SQNR = 10\log_{10} \frac{V_{signal}^2}{V_{Qnoise}^2} = 20\log_{10} \frac{V_{signal}}{V_{Qnoise}}$$

##### ■ **SQNR = nr bits x 6dB**

- 16 bits: SQNR = 96 dB → ruído, em geral, imperceptível

# Representação Computacional de Áudio

## ◆ Áudio digital (cont.)

### ■ **Número de canais**

#### ◆ **Sinal estereofónico** (stereo)

- 2 canais, inspirado no facto dos seres humanos terem dois ouvidos
- Cada canal pode ter elementos áudio distintos

#### ◆ **Sinal monoaural** (mono)

- 1 só canal
- Menos realistas e mais “amorfos” que sinais stereo
- Metade do espaço de sinais stereo

#### ◆ **Som 5.1**

- Home cinema

# Representação Computacional de Áudio

## ◆ Áudio digital (cont.)

### ■ **Qualidade de som digitalizado** (em geral)

- ◆ Atributo subjectivo, influenciado pelo:
  - **Equipamento** utilizado na audição
  - **Sujeito** (acuidade auditiva, atenção, treino)
  - **Tipo de som**
  - Parâmetros utilizados na **aquisição do som analógico original** (amplificação, filtros, etc.)
  - Tipo de **compressão** utilizada (taxa, algoritmo)

# Representação Computacional de Áudio

## ◆ Áudio digital (cont.)

### ■ Qualidade de CD

- ◆ Padrão projectado com o objectivo de possibilitar a **reprodução de todos os sons que o ouvido humano consegue ouvir**
  - Frequência de amostragem necessária: **44.1 KHz**
    - Como o ouvido humano médio só capta frequências até cerca de 20Khz, frequências de amostragem superiores seriam inúteis
  - Quantização: **16 bits**
  - Nr. canais: 2 (**stereo**)
- ◆ Será que abarca tudo?
  - Semelhante a som analógico para a maioria dos ouvintes
  - Pessoas com maior acuidade auditiva podem ouvir ruído de quantização e ausência de altas frequências

# Representação Computacional de Áudio

## ◆ Áudio digital (cont.)

### ■ Qualidade e fluxo de dados

Quality	Sampling rate (kHz)	Bits per sample	Mono/ Stereo	Bitrate (if uncompressed) (kB/s)	Signal bandwidth (Hz)
Telephone	8	8	Mono	8	200–3,400
AM radio	11.025	8	Mono	11.0	100–5,500
FM radio	22.05	16	Stereo	88.2	20–11,000
CD	44.1	16	Stereo	176.4	5–20,000
DVD audio	192 (max)	24 (max)	Up to 6 channels	1,200.0 (max)	0–96,000 (max)

© Ze-Nian Li 2014, p. 152

- Som não comprimido com qualidade CD: ~ 10.6 MB/minuto
- Quanto maior o fluxo, melhor a qualidade

*Nota: Bps ≠ bps (Bytes/seg vs bits/seg)*



# Representação Computacional de Áudio

## ◆ Som simbólico

- Definição
  - ◆ Objectos acústicos representados através de elementos simbólicos básicos, e.g., nota musical, duração, etc.
- Criação
  - ◆ Utilização de eventos simples (ou agregações) fornecidas pelo editor



<https://www.soundonsound.com/techniques/midi-score-editors>

# Representação Computacional de Áudio

## ◆ Som simbólico (cont.)

- Exemplo: MIDI (Musical Instrument Digital Interface)
  - ◆ Standard de comunicação para interacção entre instrumentos electrónicos e computadores (comunicação, controlo e sincronização em tempo real)
    - Comunicação entre dispositivos por meio de mensagens
      - Mensagem enviada e interpretada por um dispositivo MIDI de playback → som correspondente produzido



© [http://www.pctechguide.com/44SoundCards\\_MIDI.htm](http://www.pctechguide.com/44SoundCards_MIDI.htm)

# Representação Computacional de Áudio

## ◆ Som simbólico (cont.)

### ■ MIDI (cont.)

- ◆ Protocolo para descrição detalhada de elementos musicais: nota, duração, instante, velocidade (intensidade), instrumento, ...
- ◆ Ficheiro MIDI
  - Lista de comandos (**mensagens MIDI**) que inclui, e.g., **especificação do instrumento**, as noções de **início e fim de nota**, **frequência básica** e **volume do som** (e.g., tocar a nota La num piano)
  - O padrão MIDI inclui **16 canais**, cada um dos quais pode tratar um instrumento
  - O padrão MIDI identifica **128 instrumentos**, incluindo sons sintéticos, instrumentos étnicos e efeitos sonoros. Por exemplo o violino é o instrumento 40 e a flauta é o 73

# Representação Computacional de Áudio

## ◆ Som simbólico (cont.)

### ■ Requisitos de armazenamento

- ◆ Substancialmente menores: objecto acústico descrito “linguisticamente” e não na forma de amostras da onda sonora

#### ■ Exemplo: MIDI

	Byte de Status (mensagem NOTE ON enviada para o canal MIDI 1)	Byte de dados (nr. da nota)	Byte de dados (velocidade da nota)
Binário	10010000	00111110	01100100
Equivalent decimal	4 bits iniciais especificam a mensagem NOTE ON.  4 bytes finais especificam o canal	62 (D -Ré- a 293.66 Hz)	100 (mezzo forte)

- ... Byte NOTE OFF (1 byte), delta time (4 bytes)...
- É também armazenada informação do instante temporal de cada evento

# Representação Computacional de Áudio

## ◆ Som simbólico (cont.)

- Requisitos de armazenamento (cont.)
  - ◆ Exemplo anterior:
    - Simbólico:
      - Duração = 0.5s
      - 11 bytes (delta time, note on, nota, velocidade; delta time, note off; fora cabeçalhos, etc.)
    - Áudio digital (qualidade de CD):  $44100\text{Hz} \times 0.5\text{s} \times 2 \text{ bytes} = 44100 \text{ bytes!}$
  - Software interpreta as instruções e faz o reprodução do som de acordo

# Representação Computacional de Áudio

## ◆ Som simbólico vs áudio digital

### ■ Vantagens de som simbólico

- ◆ Espaço em disco menor (no entanto, formatos digitais comprimidos podem ser utilizados)
  - 200 a 1000 vezes mais pequenos que ficheiros digitais com qualidade de CD (20 a 100 vezes mais pequenos que mp3)
  - Utilizando este formato, **dez minutos de música correspondem a cerca de 200 KBytes**
    - CD áudio: cerca de 106Mbytes
- ◆ Tempo de transferência via web menor
- ◆ Mais manipuláveis, uma vez que cada elemento pode ser seleccionado e manipulado individualmente
  - Tempo alterável sem mudança na altura do tom
  - Possível alterar objectos acústicos. E.g., nota, instrumento, intensidade, ...



# Representação Computacional de Áudio

- ◆ Som simbólico vs áudio digital (cont.)
  - Limitações de som simbólico
    - ◆ Som artificial (embora o realismo seja cada vez maior)
    - ◆ Áudio gerado dependente do dispositivo (tecnologia de síntese de som utilizada)
    - ◆ Síntese de voz cantada difícil
      - Dispositivos MIDI podem sintetizar sons vocais mas
        - Não são genéricos
        - Qualidade do som duvidosa
    - ◆ Utilização requer alguns conhecimentos de teoria musical

# Representação Computacional de Áudio

## ◆ Conversão entre áudio digital e som digital

- Som simbólico → áudio digital: fácil
  - ♦ Na prática, um ficheiro MIDI, MusicXML, etc. é renderizado como áudio digital
  - ♦ Basta gravar o sinal de saída da placa de som
    - Software de edição permite guardar em formatos áudio digital
- Áudio digital → som simbólico: difícil...
  - ♦ Software de transcrição automática (e.g., Solo Explorer, WidiSoft, Intelliscore)
    - Detectar elementos básicos no sinal digital (harmónicos, notas, instrumentos)
  - ♦ Resultados satisfatórios apenas em sinais monofónicos
    - Ainda assim, mudanças de timbre poderão ser notórias, dependendo do instrumento original e da tecnologia de síntese de som