

Computação Musical - Introdução

slides do curso MAC0337/5900 – Computação Musical,
baseados no capítulo 1 do livro de F. Richard Moore
Elements of Computer Music

Marcelo Queiroz

Departamento de Ciência da Computação
Instituto de Matemática e Estatística
Universidade de São Paulo

Versão de 10/03/2013

Conteúdo

- Introdução
- Dados e processos musicais
- Pensamento musical
- Composição
- Performance
- Instrumentos
- Salas
- Escuta
- Contexto interdisciplinar

Preâmbulo

- Moore pede pré-requisitos fortes! Eu não...

Preâmbulo

- Moore pede pré-requisitos fortes! Eu não...
- Teoria musical é interessante, mas não será cobrada.

Preâmbulo

- Moore pede pré-requisitos fortes! Eu não...
- Teoria musical é interessante, mas não será cobrada.
- Programação é interessante, mas iremos trabalhar com uma linguagem nova a partir do zero (exemplos em C do Moore podem ser ignorados).

Preâmbulo

- Moore pede pré-requisitos fortes! Eu não...
- Teoria musical é interessante, mas não será cobrada.
- Programação é interessante, mas iremos trabalhar com uma linguagem nova a partir do zero (exemplos em C do Moore podem ser ignorados).
- Matemática é importantíssima, mas tentaremos construir a maior parte do ferramental necessário a partir de matemática elementar do colegial (apesar de uma ou outra digressão menos elementar).

Preâmbulo

- Resumindo: Não se desesperem! (a despeito dos comentários nas páginas xi, 5 e 25 do Moore...)

Preâmbulo

- Resumindo: Não se desesperem! (a despeito dos comentários nas páginas xi, 5 e 25 do Moore...)
- Leiam o texto original, que contém discussões interessantíssimas que não teremos tempo de fazer aqui (só na introdução ele fala em Platão, Astronomia, 6^o sentido e percepção do tempo, etc.).

Marcos históricos

- Primeiros registros analógicos (final do séc. XIX)

Marcos históricos

- Primeiros registros analógicos (final do séc. XIX)
- Emancipação do ruído (Luigi Russolo - A arte do ruído 1913 - Intonarumori)

Marcos históricos

- Primeiros registros analógicos (final do séc. XIX)
- Emancipação do ruído (Luigi Russolo - A arte do ruído 1913 - Intonarumori)
- Inclusão de fonogramas em peças orquestrais (1924 - Pinheiros de Roma - Ottorino Respighi)

Marcos históricos

- Primeiros registros analógicos (final do séc. XIX)
- Emancipação do ruído (Luigi Russolo - A arte do ruído 1913 - Intonarumori)
- Inclusão de fonogramas em peças orquestrais (1924 - Pinheiros de Roma - Ottorino Respighi)
- Instrumentos eletrônicos (Theremin 1919, Ondes Martenot 1928, Trautonium 1929,...) e sua inclusão no repertório tradicional

Marcos históricos

- Musique Concrète (Pierre Schaeffer, 1940s, Estúdios da Radiodiffusion-Télévision Française)

Marcos históricos

- Musique Concrète (Pierre Schaeffer, 1940s, Estúdios da Radiodiffusion-Télévision Française)
- Elektronische Musik (Karlheinz Stockhausen, 1940s-1950s, Estúdios da West-Deutscher Rundfunk)

Marcos históricos

- Musique Concrète (Pierre Schaeffer, 1940s, Estúdios da Radiodiffusion-Télévision Française)
- Elektronische Musik (Karlheinz Stockhausen, 1940s-1950s, Estúdios da West-Deutscher Rundfunk)
- Música gerada por computador (Illiac Suite, 1956)

Usos do computador

- Representação de dados sonoros e musicais

Usos do computador

- Representação de dados sonoros e musicais
- Manipulação de dados sonoros e musicais

Usos do computador

- Representação de dados sonoros e musicais
- Manipulação de dados sonoros e musicais
- Simulação de processos musicais tradicionais

Usos do computador

- Representação de dados sonoros e musicais
- Manipulação de dados sonoros e musicais
- Simulação de processos musicais tradicionais
- Criação de novos processos musicais

Usos do computador

- Representação de dados sonoros e musicais
- Manipulação de dados sonoros e musicais
- Simulação de processos musicais tradicionais
- Criação de novos processos musicais
- Experimentação (repetição exata, alta precisão temporal)

Pensamento musical

- Experiência prévia

Pensamento musical

- Experiência prévia
- Imaginação

Pensamento musical

- Experiência prévia
- Imaginação
- Meios para realização

Pensamento musical

- Experiência prévia
- Imaginação
- Meios para realização
- Exploração e invenção

Pensamento musical

- Experiência prévia
- Imaginação
- Meios para realização
- Exploração e invenção
- Exemplo ilustrativo: Klangfarbenmelodie

Composição

- Criação de discursos de sons no tempo

Composição

- Criação de discursos de sons no tempo
- Tradicionalmente: criar representações simbólicas

Composição

- Criação de discursos de sons no tempo
- Tradicionalmente: criar representações simbólicas
- parâmetros “simbólicos”: altura, dinâmica, ritmo, timbre

Composição

- Criação de discursos de sons no tempo
- Tradicionalmente: criar representações simbólicas
- parâmetros “simbólicos”: altura, dinâmica, ritmo, timbre
- correlatos físicos: frequência, intensidade, durações, [forma de onda, evolução espectral, formantes, direcionalidade]

Eventos musicais, durações e periodicidade

- formas de onda em sinais quasi-periódicos
(20 Hz – 20 kHz, 50 μ s – 50 ms)

Eventos musicais, durações e periodicidade

- formas de onda em sinais quasi-periódicos
(20 Hz – 20 kHz, 50 μ s – 50 ms)
- notas
(67 ms – 10 s, 0.1 Hz – 15 Hz)

Eventos musicais, durações e periodicidade

- formas de onda em sinais quasi-periódicos
(20 Hz – 20 kHz, 50 μ s – 50 ms)
- notas
(67 ms – 10 s, 0.1 Hz – 15 Hz)
- frases
(2 s – 60 s, 0.017 Hz – 0.5 Hz)

Eventos musicais, durações e periodicidade

- formas de onda em sinais quasi-periódicos
(20 Hz – 20 kHz, 50 μ s – 50 ms)
- notas
(67 ms – 10 s, 0.1 Hz – 15 Hz)
- frases
(2 s – 60 s, 0.017 Hz – 0.5 Hz)
- movimentos
(30 s – 20 min, 8×10^{-4} Hz – 0.033 Hz)

Eventos musicais, durações e periodicidade

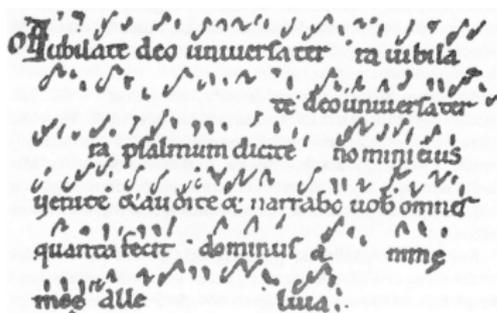
- formas de onda em sinais quasi-periódicos
(20 Hz – 20 kHz, 50 μ s – 50 ms)
- notas
(67 ms – 10 s, 0.1 Hz – 15 Hz)
- frases
(2 s – 60 s, 0.017 Hz – 0.5 Hz)
- movimentos
(30 s – 20 min, 8×10^{-4} Hz – 0.033 Hz)
- sinfonias, sonatas
(5 min – 120 min, 1.4×10^{-4} Hz – 0.0033 Hz)

Eventos musicais, durações e periodicidade

- formas de onda em sinais quasi-periódicos
(20 Hz – 20 kHz, 50 μ s – 50 ms)
- notas
(67 ms – 10 s, 0.1 Hz – 15 Hz)
- frases
(2 s – 60 s, 0.017 Hz – 0.5 Hz)
- movimentos
(30 s – 20 min, 8×10^{-4} Hz – 0.033 Hz)
- sinfonias, sonatas
(5 min – 120 min, 1.4×10^{-4} Hz – 0.0033 Hz)
- óperas
(> 120 min, $< 1.4 \times 10^{-4}$ Hz)

Notações musicais

- Neumas



Notações musicais

- Neumas
- Notação quadrada



Notações musicais

- Neumas
- Notação quadrada
- Tablaturas



Notações musicais

- Neumas
- Notação quadrada
- Tablaturas
- Notação tradicional



Notações musicais

- Neumas
- Notação quadrada
- Tablaturas
- Notação tradicional
- Notações mais recentes

KONTAKTE Aufführungspartitur Seite 1 / performance score page 1

The image shows a page of a musical score for 'KONTAKTE'. It features traditional notation with staves, time signatures, and dynamic markings. The score is divided into sections labeled [A], [B], [C], and [D]. Section [A] has a time signature of 15/7 and a dynamic marking of *mf*. Section [B] has a time signature of 2/8 and a dynamic marking of *f*. Section [C] has a time signature of 3/3 and a dynamic marking of *mf*. Section [D] has a time signature of 2/8 and a dynamic marking of *f*. The score includes various musical notations such as notes, rests, and accidentals.



Performance

Partitura só fornece instruções incompletas (ex. staccato)
Fontes de informação adicional:

Performance

Partitura só fornece instruções incompletas (ex. staccato)

Fontes de informação adicional:

- Anotações adicionais na partitura

Performance

Partitura só fornece instruções incompletas (ex. staccato)

Fontes de informação adicional:

- Anotações adicionais na partitura
- Conhecimento sobre a mecânica e a resposta do instrumento

Performance

Partitura só fornece instruções incompletas (ex. staccato)

Fontes de informação adicional:

- Anotações adicionais na partitura
- Conhecimento sobre a mecânica e a resposta do instrumento
- Conhecimento sobre estilo musical e prática de performance

Performance

Partitura só fornece instruções incompletas (ex. staccato)

Fontes de informação adicional:

- Anotações adicionais na partitura
- Conhecimento sobre a mecânica e a resposta do instrumento
- Conhecimento sobre estilo musical e prática de performance
- Feedback acústico do ambiente durante a performance

Expressividade na performance

- Variações de articulação (tipo de sopro, arcada ou toque)

Expressividade na performance

- Variações de articulação (tipo de sopro, arcada ou toque)
- Variações rítmicas (rubato, accelerandos e ritardandos)

Expressividade na performance

- Variações de articulação (tipo de sopro, arcada ou toque)
- Variações rítmicas (rubato, accelerandos e ritardandos)
- Inflexões na altura (vibrato, portamentos e outras)

Expressividade na performance

- Variações de articulação (tipo de sopro, arcada ou toque)
- Variações rítmicas (rubato, accelerandos e ritardandos)
- Inflexões na altura (vibrato, portamentos e outras)
- Inflexões na dinâmica (tremolo, crescendos e diminuendos)

Expressividade na performance

- Variações de articulação (tipo de sopro, arcada ou toque)
- Variações rítmicas (rubato, accelerandos e ritardandos)
- Inflexões na altura (vibrato, portamentos e outras)
- Inflexões na dinâmica (tremolo, crescendos e diminuendos)
- Variações de timbre (frulatto, sul ponticello, col legno, uso de plectros e outros objetos)

Famílias tradicionais

- Instrumentos de corda (friccionada, pinçada ou percutida)

Famílias tradicionais

- Instrumentos de corda (friccionada, pinçada ou percutida)
- Instrumentos de sopro (com janelas, bocais, palhetas simples e duplas)

Famílias tradicionais

- Instrumentos de corda (friccionada, pinçada ou percutida)
- Instrumentos de sopro (com janelas, bocais, palhetas simples e duplas)
- Instrumentos de percussão (barras, pratos, membranas com ressonadores, etc.)

Famílias tradicionais

- Instrumentos de corda (friccionada, pinçada ou percutida)
- Instrumentos de sopro (com janelas, bocais, palhetas simples e duplas)
- Instrumentos de percussão (barras, pratos, membranas com ressonadores, etc.)
- Vozes

Instrumentos digitais e técnicas de síntese

- Síntese aditiva (Modelo Harmônico, Phase Vocoder)

Instrumentos digitais e técnicas de síntese

- Síntese aditiva (Modelo Harmônico, Phase Vocoder)
- Síntese subtrativa (Modelo Fonte-Filtro, Formantes, Morphing)

Instrumentos digitais e técnicas de síntese

- Síntese aditiva (Modelo Harmônico, Phase Vocoder)
- Síntese subtrativa (Modelo Fonte-Filtro, Formantes, Morphing)
- Modelos não-lineares (FM, Waveshaping)

Instrumentos digitais e técnicas de síntese

- Síntese aditiva (Modelo Harmônico, Phase Vocoder)
- Síntese subtrativa (Modelo Fonte-Filtro, Formantes, Morphing)
- Modelos não-lineares (FM, Waveshaping)
- Modelos físicos (simulação por equações diferenciais, Karplus-Strong)

Acústica de salas

- Reverberação

Acústica de salas

- Reverberação
- Absorção dependente da frequência

Acústica de salas

- Reverberação
- Absorção dependente da frequência
- Colorido da sala, ênfase nos modos naturais

Acústica de salas

- Reverberação
- Absorção dependente da frequência
- Colorido da sala, ênfase nos modos naturais
- Dependência da posição de escuta

Acústica de salas

- Reverberação
- Absorção dependente da frequência
- Colorido da sala, ênfase nos modos naturais
- Dependência da posição de escuta
- Acústica da sala original x espaço de reprodução

Simulação acústica e espacialização

- Reverberadores genéricos

Simulação acústica e espacialização

- Reverberadores genéricos
- HRTFs (Head-Related Transfer Functions)

Simulação acústica e espacialização

- Reverberadores genéricos
- HRTFs (Head-Related Transfer Functions)
- Modelos geométricos (fontes virtuais, traçado de raios)

Simulação acústica e espacialização

- Reverberadores genéricos
- HRTFs (Head-Related Transfer Functions)
- Modelos geométricos (fontes virtuais, traçado de raios)
- Modelos de equação de onda

Simulação acústica e espacialização

- Reverberadores genéricos
- HRTFs (Head-Related Transfer Functions)
- Modelos geométricos (fontes virtuais, traçado de raios)
- Modelos de equação de onda
- Dificuldades com movimentação (ouvintes e fontes)

Níveis de percepção

- Campo sonoro espacial e “amostragem” dos ouvidos

Níveis de percepção

- Campo sonoro espacial e “amostragem” dos ouvidos
- Processamento no ouvido médio (transdução)

Níveis de percepção

- Campo sonoro espacial e “amostragem” dos ouvidos
- Processamento no ouvido médio (transdução)
- Processamento no ouvido interno (filtragem por bandas e recodificação)

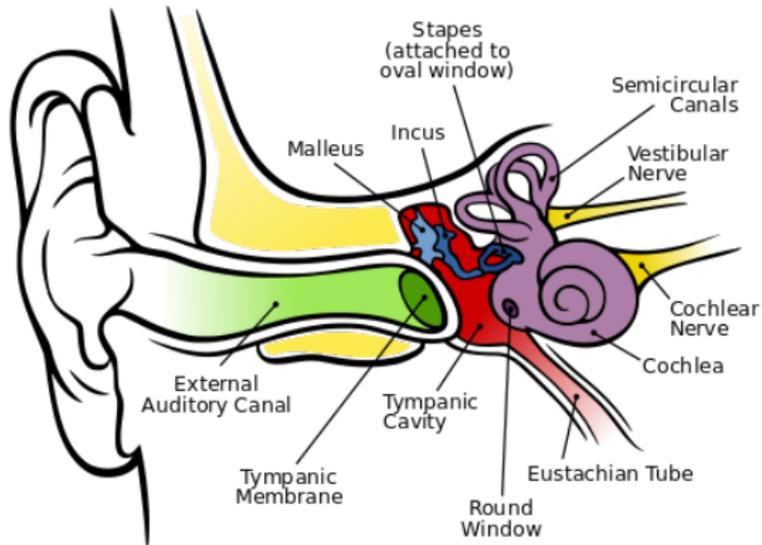
Níveis de percepção

- Campo sonoro espacial e “amostragem” dos ouvidos
- Processamento no ouvido médio (transdução)
- Processamento no ouvido interno (filtragem por bandas e recodificação)
- Processamento nos nervos auditivos (correlação LR)

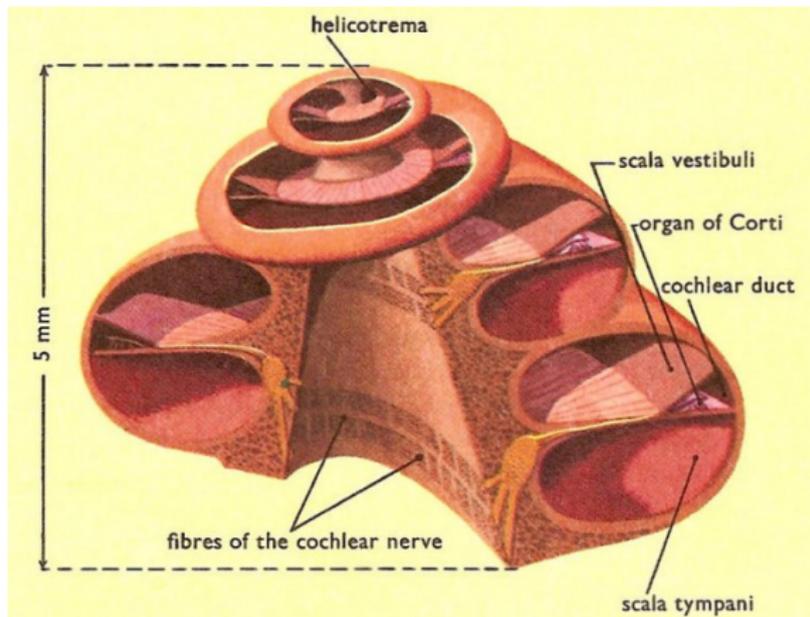
Níveis de percepção

- Campo sonoro espacial e “amostragem” dos ouvidos
- Processamento no ouvido médio (transdução)
- Processamento no ouvido interno (filtragem por bandas e recodificação)
- Processamento nos nervos auditivos (correlação LR)
- Processamento no cortex auditivo e demais regiões do cérebro

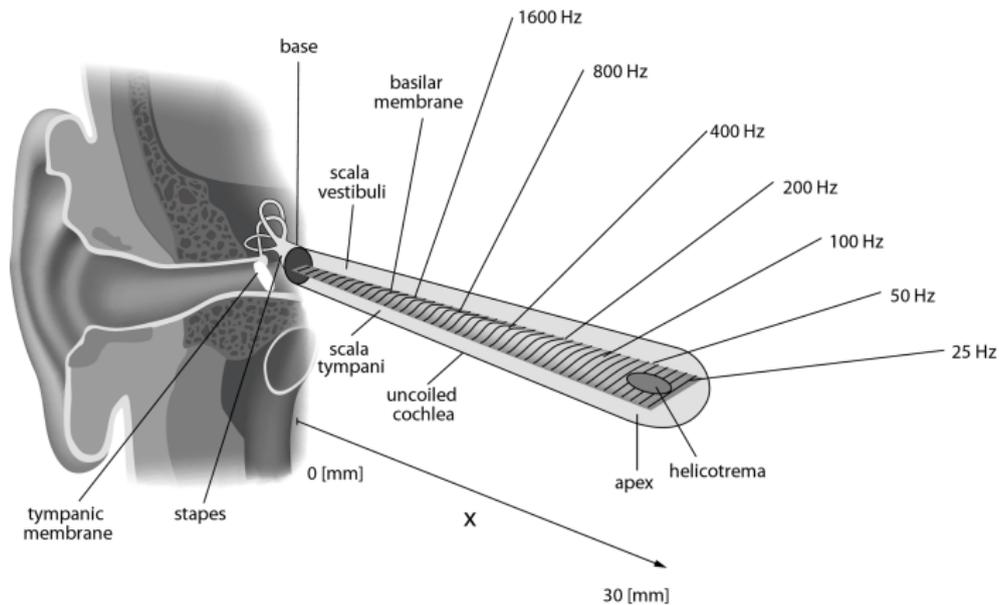
Ouvido interno e cóclea



Ouvido interno e cóclea



Ouvido interno e cóclea



Correlatos físicos, perceptuais e cognitivos

| | | |
|--------|-----------|----------|
| Física | Percepção | Cognição |
|--------|-----------|----------|

Correlatos físicos, perceptuais e cognitivos

| | | |
|--------|-----------|----------|
| Física | Percepção | Cognição |
| Ar | Ouvido | Mente |

Correlatos físicos, perceptuais e cognitivos

| | | |
|------------|-----------|-------------|
| Física | Percepção | Cognição |
| Ar | Ouvido | Mente |
| Existência | Detecção | Consciência |

Correlatos físicos, perceptuais e cognitivos

| Física | Percepção | Cognição |
|------------|-----------|-------------|
| Ar | Ouvido | Mente |
| Existência | Detecção | Consciência |
| Som | Sensação | Música |

Correlatos físicos, perceptuais e cognitivos

| Física | Percepção | Cognição |
|-------------|-------------------|-------------|
| Ar | Ouvido | Mente |
| Existência | Detecção | Consciência |
| Som | Sensação | Música |
| Intensidade | Volume (loudness) | Dinâmica |

Correlatos físicos, perceptuais e cognitivos

| Física | Percepção | Cognição |
|-------------|-------------------|------------------|
| Ar | Ouvido | Mente |
| Existência | Detecção | Consciência |
| Som | Sensação | Música |
| Intensidade | Volume (loudness) | Dinâmica |
| Frequência | Altura (pitch) | Notas/Intervalos |

Correlatos físicos, perceptuais e cognitivos

| Física | Percepção | Cognição |
|-------------|-------------------|------------------|
| Ar | Ouvido | Mente |
| Existência | Detecção | Consciência |
| Som | Sensação | Música |
| Intensidade | Volume (loudness) | Dinâmica |
| Frequência | Altura (pitch) | Notas/Intervalos |
| Espectro | Timbre | Instrumento |

Correlatos físicos, perceptuais e cognitivos

| Física | Percepção | Cognição |
|-------------|-------------------|------------------|
| Ar | Ouvido | Mente |
| Existência | Detecção | Consciência |
| Som | Sensação | Música |
| Intensidade | Volume (loudness) | Dinâmica |
| Frequência | Altura (pitch) | Notas/Intervalos |
| Espectro | Timbre | Instrumento |
| Radiação | Localização | Espacialidade |

Percepção de Volume

- Nível de intensidade sonora (medido em dB a 1000Hz):

$$IL(I) = 10 \log_{10} \frac{I}{10^{-12}}$$

onde 10^{-12} W/m^2 é o limiar da audição humana.

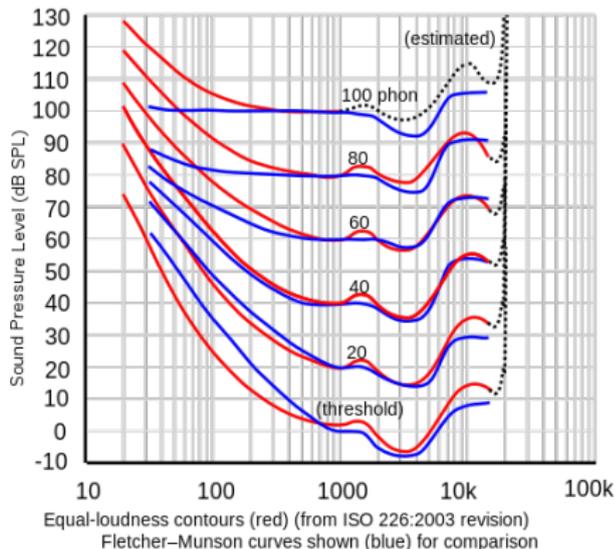
Percepção de Volume

- Nível de intensidade sonora (medido em dB a 1000Hz):

$$IL(I) = 10 \log_{10} \frac{I}{10^{-12}}$$

onde 10^{-12} W/m^2 é o limiar da audição humana.

- Curvas de Fletcher-Munson:



Percepção de Volume

- Nível de Loudness (medido em *phons*) serve apenas para estabelecer equivalência entre sons de frequência diferentes e mesma “intensidade perceptual”

Percepção de Volume

- Nível de Loudness (medido em *phons*) serve apenas para estabelecer equivalência entre sons de frequência diferentes e mesma “intensidade perceptual”
- Para comparar volumes diferentes é necessário usar a escala subjetiva de Loudness, medida em *sones*:

$$L \propto \sqrt[3]{I}$$

Percepção de Volume

- Nível de Loudness (medido em *phons*) serve apenas para estabelecer equivalência entre sons de frequência diferentes e mesma “intensidade perceptual”
- Para comparar volumes diferentes é necessário usar a escala subjetiva de Loudness, medida em *sones*:

$$L \propto \sqrt[3]{I}$$

- Exemplo: para dobrar o Loudness subjetivo é necessário multiplicar a intensidade física por 8, o que corresponde a um aumento de $10 \log_{10} 8 \approx 9$ dB no nível físico de Loudness.

Percepção de Volume

E fica mais complicado...

- a fórmula anterior só se aplica se as componentes frequenciais f_1, f_2, \dots, f_N caem na mesma *banda crítica*:

$$L \propto \sqrt[3]{I_1 + I_2 + \dots + I_N}$$

Percepção de Volume

E fica mais complicado...

- a fórmula anterior só se aplica se as componentes frequenciais f_1, f_2, \dots, f_N caem na mesma *banda crítica*:

$$L \propto \sqrt[3]{I_1 + I_2 + \dots + I_N}$$

- se as componentes caem em bandas críticas diferentes, o Loudness subjetivo obedecerá

$$L \propto \sqrt[3]{I_1} + \sqrt[3]{I_2} + \dots + \sqrt[3]{I_N}$$

Percepção de Volume

- Exemplo: se $I_1 = I_2$ os dois sons juntos parecerão mais fortes se estiverem afastados de um intervalo maior do que uma banda crítica do que se estiverem muito próximos

Percepção de Volume

- Exemplo: se $I_1 = I_2$ os dois sons juntos parecerão mais fortes se estiverem afastados de um intervalo maior do que uma banda crítica do que se estiverem muito próximos
- Finalmente, se as distâncias forem muito maiores do que uma banda crítica, pode ocorrer o fenômeno de mascaramento:

$$L \propto \max\{\sqrt[3]{I_1}, \sqrt[3]{I_2}, \dots, \sqrt[3]{I_N}\}$$

Percepção de Altura

- A relação entre altura musical e frequência em sinais periódicos “costuma” obedecer a uma relação logarítmico-exponencial: quocientes iguais de frequência correspondem a intervalos melódicos iguais:

Percepção de Altura

- A relação entre altura musical e frequência em sinais periódicos “costuma” obedecer a uma relação logarítmico-exponencial: quocientes iguais de frequência correspondem a intervalos melódicos iguais:

$$2:1 = \text{oitava}$$

Percepção de Altura

- A relação entre altura musical e frequência em sinais periódicos “costuma” obedecer a uma relação logarítmico-exponencial: quocientes iguais de frequência correspondem a intervalos melódicos iguais:
 $2:1 = \textit{oitava}$
 $3:2 = \textit{quinta justa}$

Percepção de Altura

- A relação entre altura musical e frequência em sinais periódicos “costuma” obedecer a uma relação logarítmico-exponencial: quocientes iguais de frequência correspondem a intervalos melódicos iguais:

$$2:1 = \textit{oitava}$$

$$3:2 = \textit{quinta justa}$$

$$4:3 = \textit{quarta justa}$$

Percepção de Altura

- A relação entre altura musical e frequência em sinais periódicos “costuma” obedecer a uma relação logarítmico-exponencial: quocientes iguais de frequência correspondem a intervalos melódicos iguais:

$$2:1 = \textit{oitava}$$

$$3:2 = \textit{quinta justa}$$

$$4:3 = \textit{quarta justa}$$

$$5:4 = \textit{terça maior}$$

Percepção de Altura

- A relação entre altura musical e frequência em sinais periódicos “costuma” obedecer a uma relação logarítmico-exponencial: quocientes iguais de frequência correspondem a intervalos melódicos iguais:

$2:1 = \textit{oitava}$

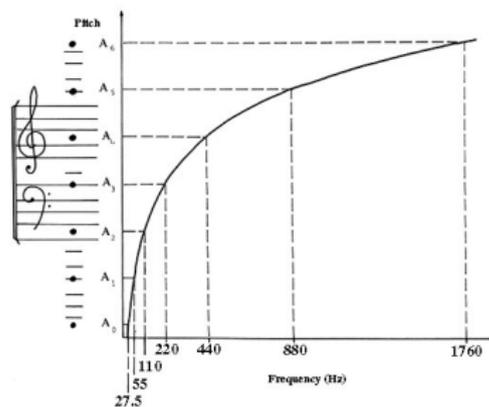
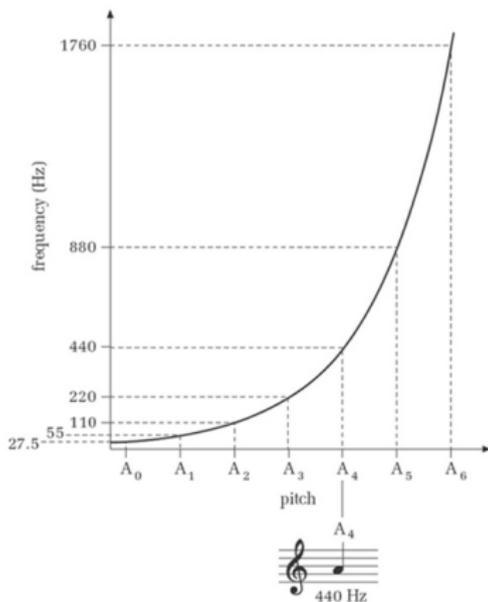
$3:2 = \textit{quinta justa}$

$4:3 = \textit{quarta justa}$

$5:4 = \textit{terça maior}$

$6:5 = \textit{terça menor ...}$

Percepção de Altura



Percepção de Altura

- No caso da escala de 12 semitons temperados, vale que 1 semitom corresponde ao quociente $\sqrt[12]{2} = 2^{\frac{1}{12}}$,

Percepção de Altura

- No caso da escala de 12 semitons temperados, vale que 1 semitom corresponde ao quociente $\sqrt[12]{2} = 2^{\frac{1}{12}}$, ou ainda

$$f_{Hz}(k) = F_0 2^{\frac{k}{12}}$$

onde F_0 é uma frequência de referência qualquer e k é o número de semitons acima ou abaixo de F_0

Percepção de Altura

- No caso da escala de 12 semitons temperados, vale que 1 semitom corresponde ao quociente $\sqrt[12]{2} = 2^{\frac{1}{12}}$, ou ainda

$$f_{Hz}(k) = F_0 2^{\frac{k}{12}}$$

onde F_0 é uma frequência de referência qualquer e k é o número de semitons acima ou abaixo de F_0

- Porém: nos extremos grave e agudo a percepção se desvia um pouco da teoria

Percepção de Altura

- No caso da escala de 12 semitons temperados, vale que 1 semitom corresponde ao quociente $\sqrt[12]{2} = 2^{\frac{1}{12}}$, ou ainda

$$f_{Hz}(k) = F_0 2^{\frac{k}{12}}$$

onde F_0 é uma frequência de referência qualquer e k é o número de semitons acima ou abaixo de F_0

- Porém: nos extremos grave e agudo a percepção se desvia um pouco da teoria
- Além disso a percepção intervalar melódica e harmônica não é igual (escala de *mels*)

Contexto interdisciplinar

