

Computação Musical - Acústica de Salas

*slides do curso MAC0337/5900 – Computação Musical,
baseados no capítulo 4 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 16/12/2020

Conteúdo

- Espaços de escuta
- Resposta de eco inicial
- Reverberação
- Espacialização

Espaços de escuta

Trabalhos pioneiros em acústica de salas (Sabine)

- Absorção dos materiais \longleftrightarrow janelas abertas

$$A = \sum_i a_i s_i$$

Material	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	5000 Hz
Acoustic tile, ceiling	.80	.90	.90	.95	.90	.85
Brick, unglazed	.03	.03	.03	.04	.05	.07
Carpet, heavy, on felt over concrete	.08	.25	.60	.70	.72	.75
Carpet, heavy, on concrete	.05	.10	.30	.50	.60	.65
Concrete, smooth, unpainted	.01	.01	.01	.02	.02	.03
Concrete, painted	.10	.05	.10	.20	.40	.60
Curtains, heavy velour	.15	.35	.55	.75	.70	.60
Fiberglass, 3 cm thick	.20	.50	.90	.95	.90	.85
Glass, ordinary window	.35	.25	.20	.10	.07	.04
Linoleum or tile on concrete	.02	.03	.03	.03	.03	.02
Marble or glazed tile	.01	.01	.01	.01	.02	.02
Plaster on concrete or brick	.10	.10	.08	.05	.05	.05
Plywood paneling on studs	.30	.20	.15	.10	.09	.09
Wood floor	.15	.11	.10	.07	.06	.07
Wood floor over concrete	.04	.04	.07	.06	.06	.07

Trabalhos pioneiros em acústica de salas (Sabine)

- Tempo de reverberação \propto volume e \propto^{-1} área de absorção

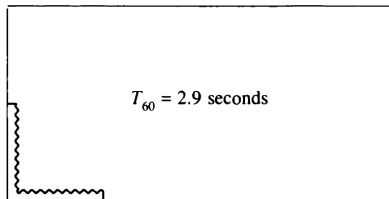
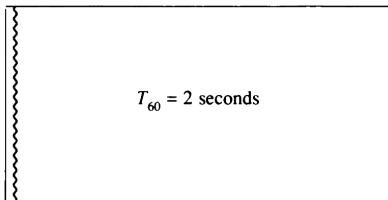
$$T_{60} = \frac{0.16V}{V \cdot s_{ar} + A}$$

Trabalhos pioneiros em acústica de salas (Sabine)

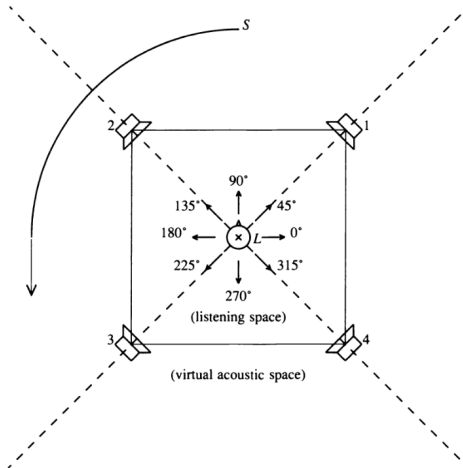
- Tempo de reverberação \propto volume e \propto^{-1} área de absorção

$$T_{60} = \frac{0.16V}{V \cdot s_{ar} + A}$$

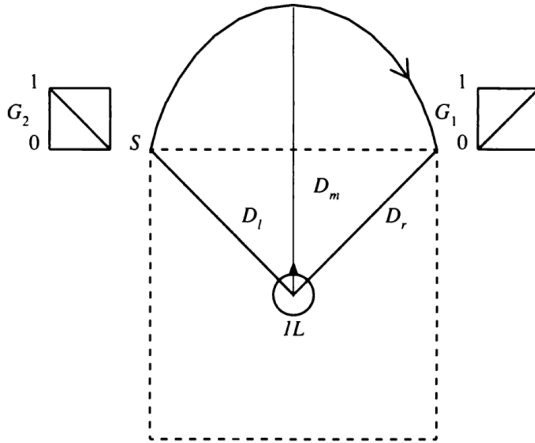
- Porém...



Simulação acústica



Panorameamento de intensidade



Panorameamento de intensidade

- energia/intensidade sonora decai com quadrado da distância

$$A^2 \propto I \propto \frac{1}{D^2} \iff A \propto \sqrt{I} \propto \frac{1}{D}$$

Panorameamento de intensidade

- energia/intensidade sonora decai com quadrado da distância

$$A^2 \propto I \propto \frac{1}{D^2} \iff A \propto \sqrt{I} \propto \frac{1}{D}$$

- controle de ganho/distância em ângulos intermediários

$$G_1^2 + G_2^2 = \text{constante}$$

Panorameamento de intensidade

- energia/intensidade sonora decai com quadrado da distância

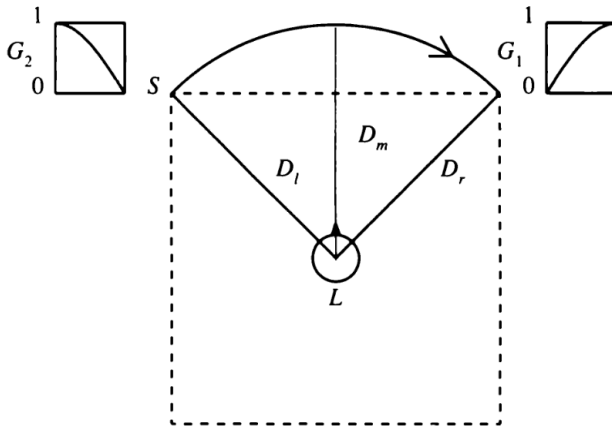
$$A^2 \propto I \propto \frac{1}{D^2} \iff A \propto \sqrt{I} \propto \frac{1}{D}$$

- controle de ganho/distância em ângulos intermediários

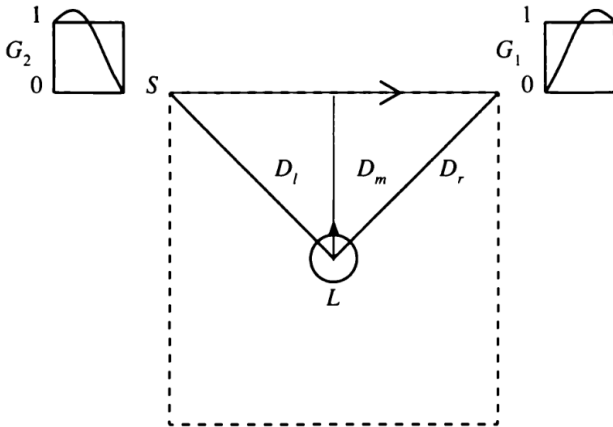
$$G_1^2 + G_2^2 = \text{constante}$$

$$G_n(\theta, D) = \frac{D_n}{D} \cos(\theta - \theta_n) \quad \text{se } |\theta - \theta_n| < \frac{\pi}{2} \quad \text{senão } 0$$

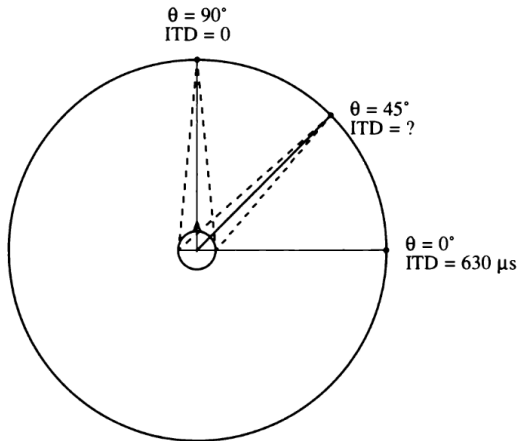
Panorameamento de intensidade



Panorameamento de intensidade

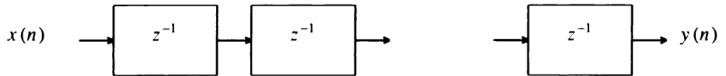


Pistas de direção: ITD e ILD



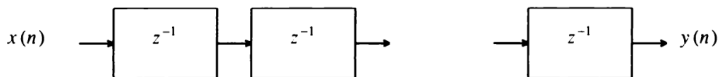
Linhas de delay para simulação de atraso

- Para fontes com distância fixa, pode-se usar um filtro aproximado:



Linhas de delay para simulação de atraso

- Para fontes com distância fixa, pode-se usar um filtro aproximado:

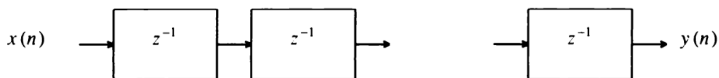


- Se a distância varia, é necessário interpolar:

$$y(t) = (\lfloor t \rfloor + 1 - t)x(\lfloor t \rfloor) + (t - \lfloor t \rfloor)x(\lfloor t \rfloor + 1) \quad (\text{linear})$$

Linhas de delay para simulação de atraso

- Para fontes com distância fixa, pode-se usar um filtro aproximado:



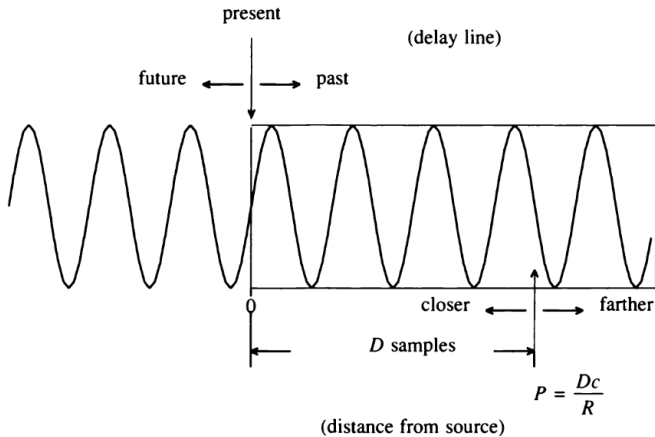
- Se a distância varia, é necessário interpolar:

$$y(t) = (\lfloor t \rfloor + 1 - t)x(\lfloor t \rfloor) + (t - \lfloor t \rfloor)x(\lfloor t \rfloor + 1) \quad (\text{linear})$$

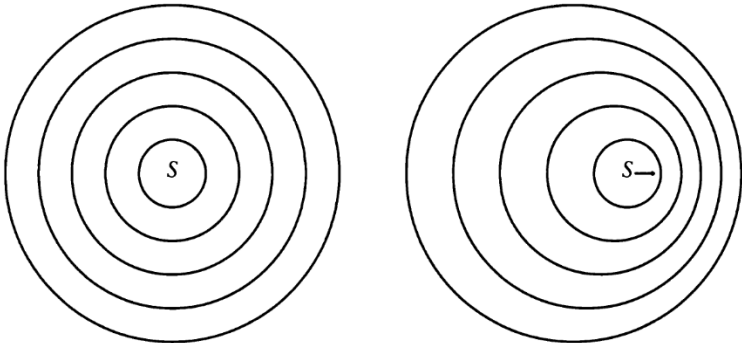
$$y(t) = -\frac{f(f-1)(f-2)}{6}x(\lfloor t \rfloor - 1) + \frac{(f+1)(f-1)(f-2)}{2}x(\lfloor t \rfloor) \\ - \frac{(f+1)f(f-2)}{2}x(\lfloor t \rfloor + 1) + \frac{(f+1)f(f-1)}{6}x(\lfloor t \rfloor + 2)$$

onde $f = t - \lfloor t \rfloor$ (cúbica)

Linhas de delay variáveis

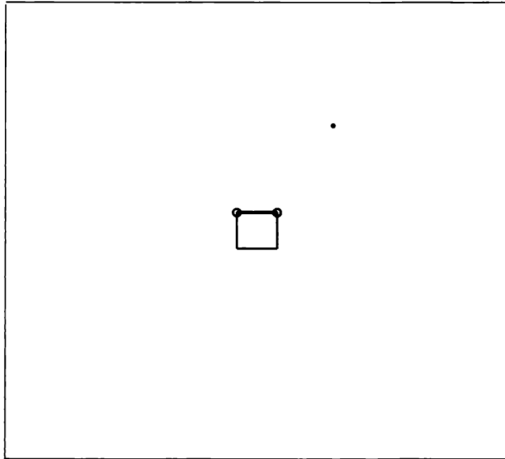


Linhas de delay variáveis e efeito Doppler

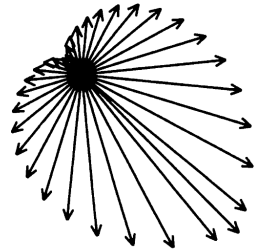
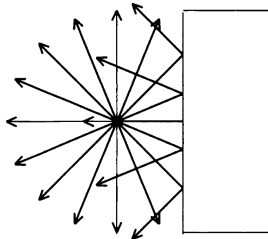
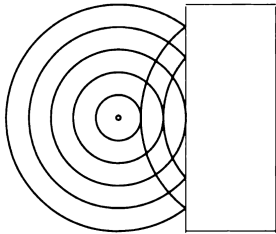


Resposta de eco inicial

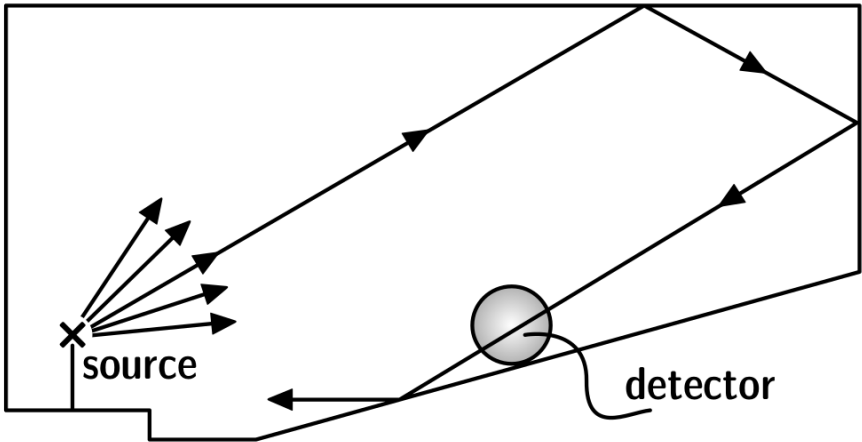
Espaço de escuta e espaço simulado



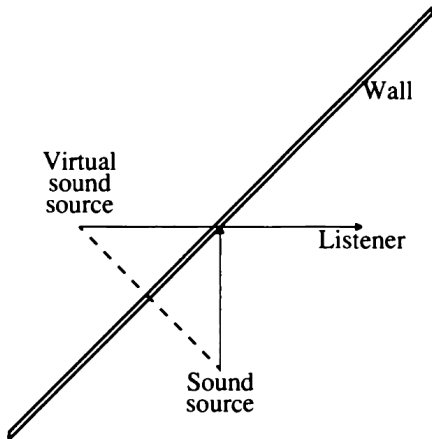
Propagação e radiação sonora



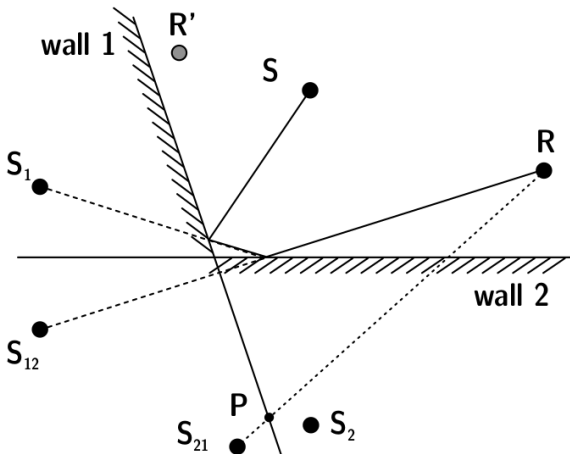
Reflexões e traçado de raios



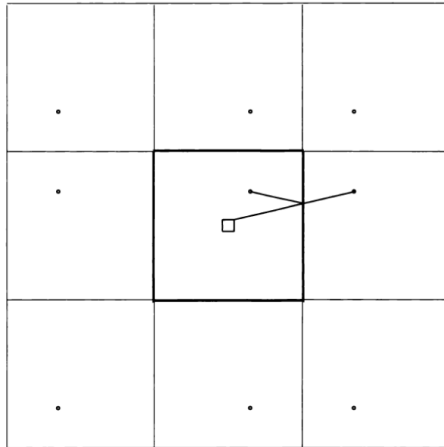
Reflexões e fontes virtuais



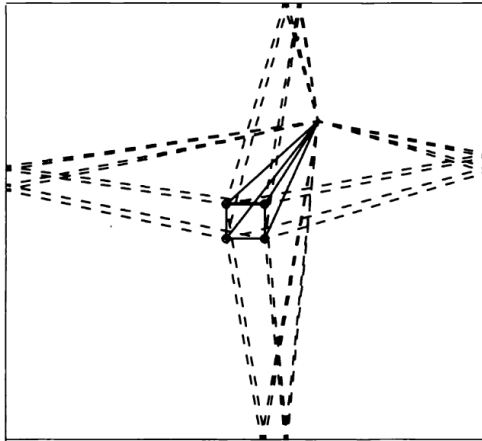
Teste de audibilidade de fontes virtuais



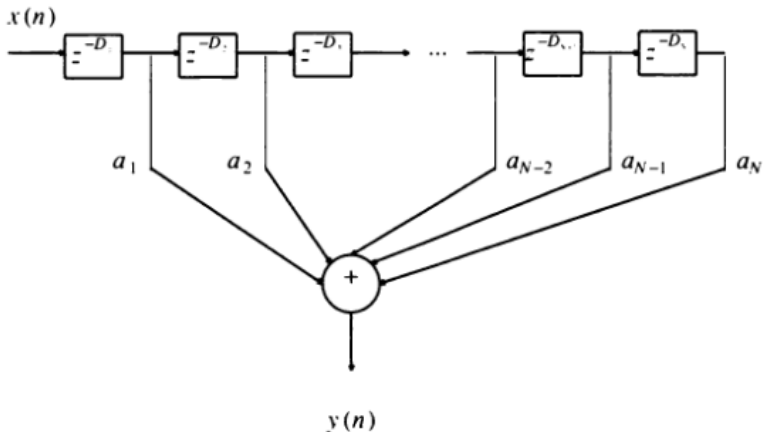
Construção de um ecograma



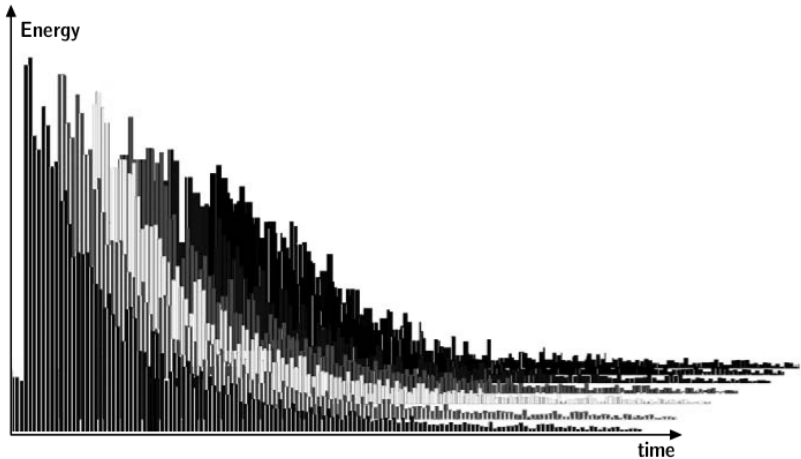
Construção de um ecograma



Resposta de eco inicial como filtro FIR



Resposta impulsiva em função da frequência



Reverberação

Resposta de reverberação tardia

- A densidade de reflexões cresce de acordo com

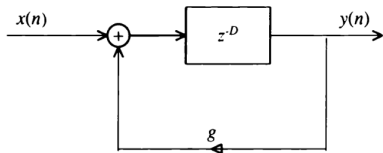
$$\rho = \frac{\frac{4}{3}\pi(c(t+1))^3 - \frac{4}{3}\pi(ct)^3}{V} \approx \frac{4\pi c^3 t^2}{V}$$

- Sobreposições em fatias de duração Δt ocorrem quando

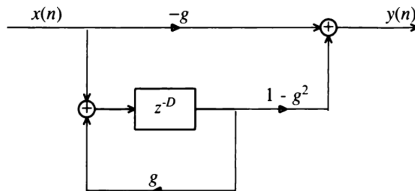
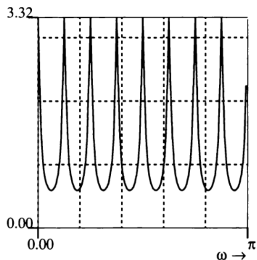
$$\rho \Delta t \geq 1 \iff t \geq 4.5 \cdot 10^{-5} \sqrt{\frac{V}{\Delta t}}$$

Por exemplo: numa sala de volume $V=10000 \text{ m}^3$, usando $\Delta t = 1 \text{ ms}$ temos que as reflexões tendem a colidir após $t \geq 142 \text{ ms}$ (começo da reverberação “densa”).

Simulação de reverberação densa e difusão

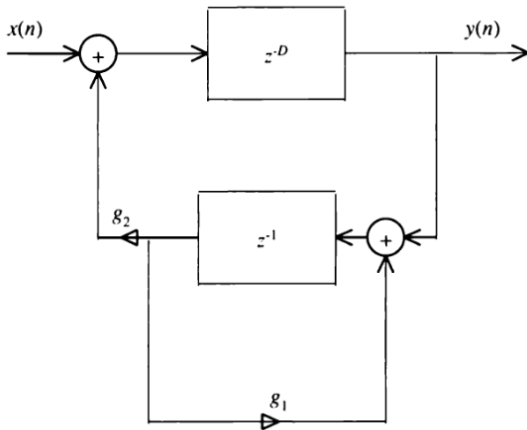


(comb filter)

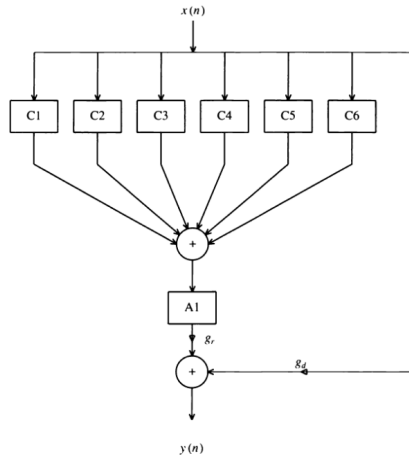


(allpass reverberation filter)

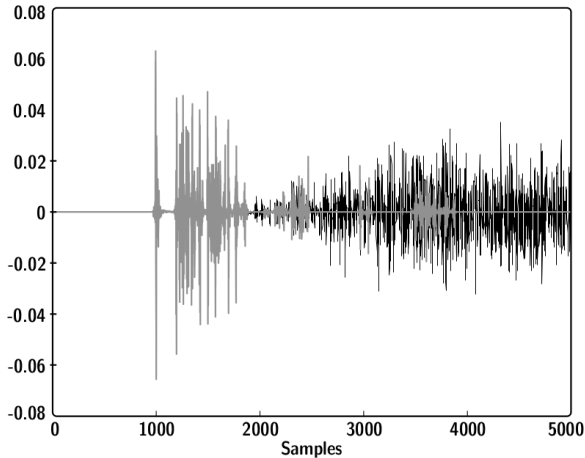
Decaimento dependente da frequência



Arquitetura de um reverberador denso

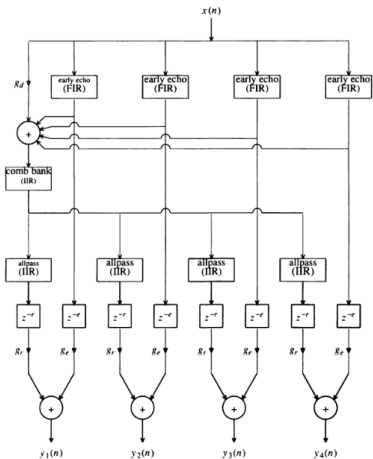


Resposta impulsiva completa (eco inicial+rev.densa)

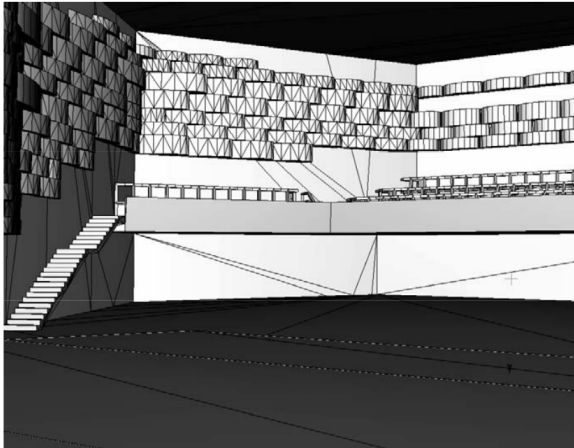


Espacialização

Arquitetura de um reverberador multicanal

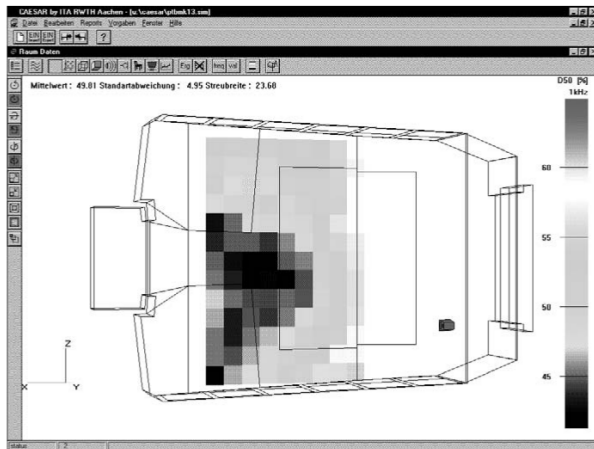


Simulação acústica de espaços reais



Espaços de escuta
Resposta de eco inicial
Reverberação
Especialização
Objetos relacionados no PureData

Simulação acústica de espaços reais



Objetos Pd

Objetos relacionados no PureData

- `[z~ N]` (biblioteca `zexy`): atraso fixo de N (inteiro) amostras
- `[delwrite~]/[delread4~]`: escrita e leitura interpolada com atraso variável
- filtros `comb/allpass`: podem ser construídos com `[fexpr~]` ou `[cpole~]/[czero~]`
- `[rev1~]`, `[rev2~]`, `[rev3~]`: reverberadores “experimentais”
- `[freeverb~]` (biblioteca `freeverb`): implementação livre de um reverberador “genérico”