

ÁUDIO ESPACIAL

Agenda

2

- Motivação Musical
- Percepção Espacial
- Técnicas de Auralização
- *Software* para espacialização
- Casos de Uso em Música

Agenda

3

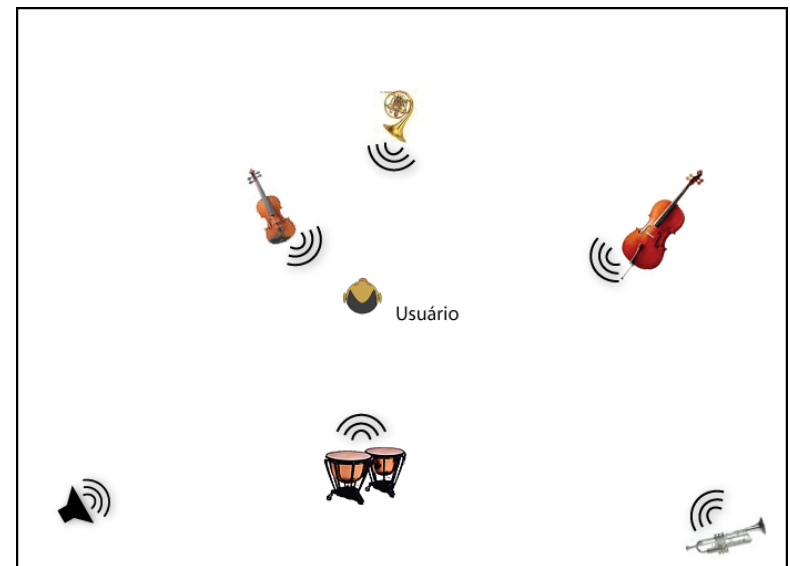
- **Motivação Musical**
 - Espacialização na Música
 - Histórico
- Percepção Espacial
- Técnicas de Auralização
- *Software* para espacialização
- Casos de Uso em Música

Motivação Musical

Espacialização na Música

4

- Fuga do senso comum de espaço
- Espaço como um dos parâmetros da peça musical
- Fontes sonoras com:
 - posicionamento incomum
 - movimentação
 - ambientação



Posicionamento de fontes sonoras virtuais envolvendo o ouvinte

Motivação Musical

Histórico

5



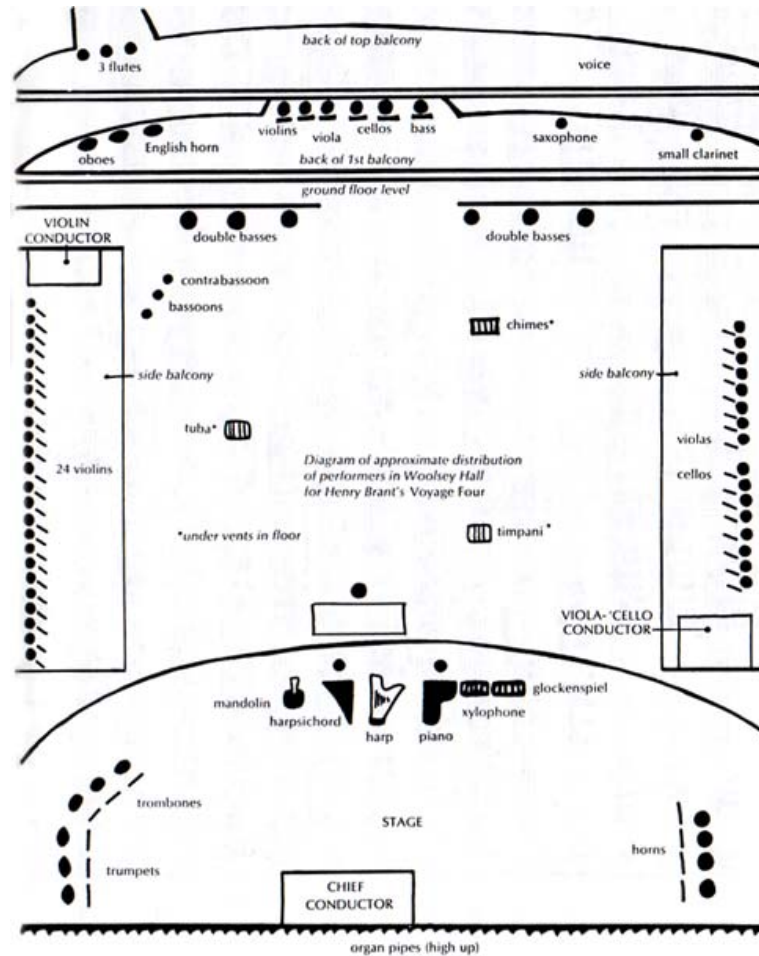
Gruppen, Stockhausen (1955-57)

Motivação Musical

Histórico

6

Voyage Four,
de H. Brant (1964)

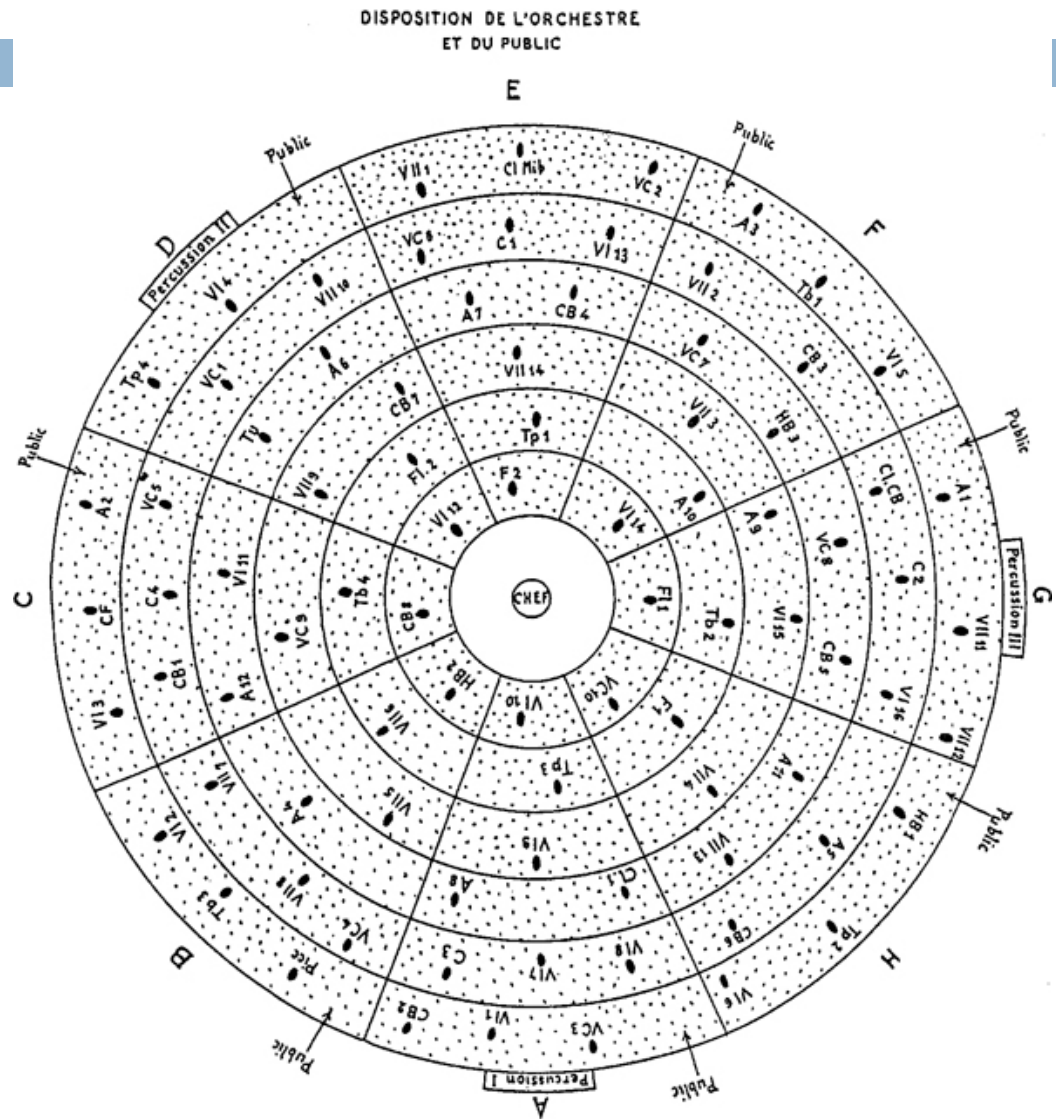


Motivação Musical

Histórico

7

Terretektorth, I. Xenakis
(1965-66)

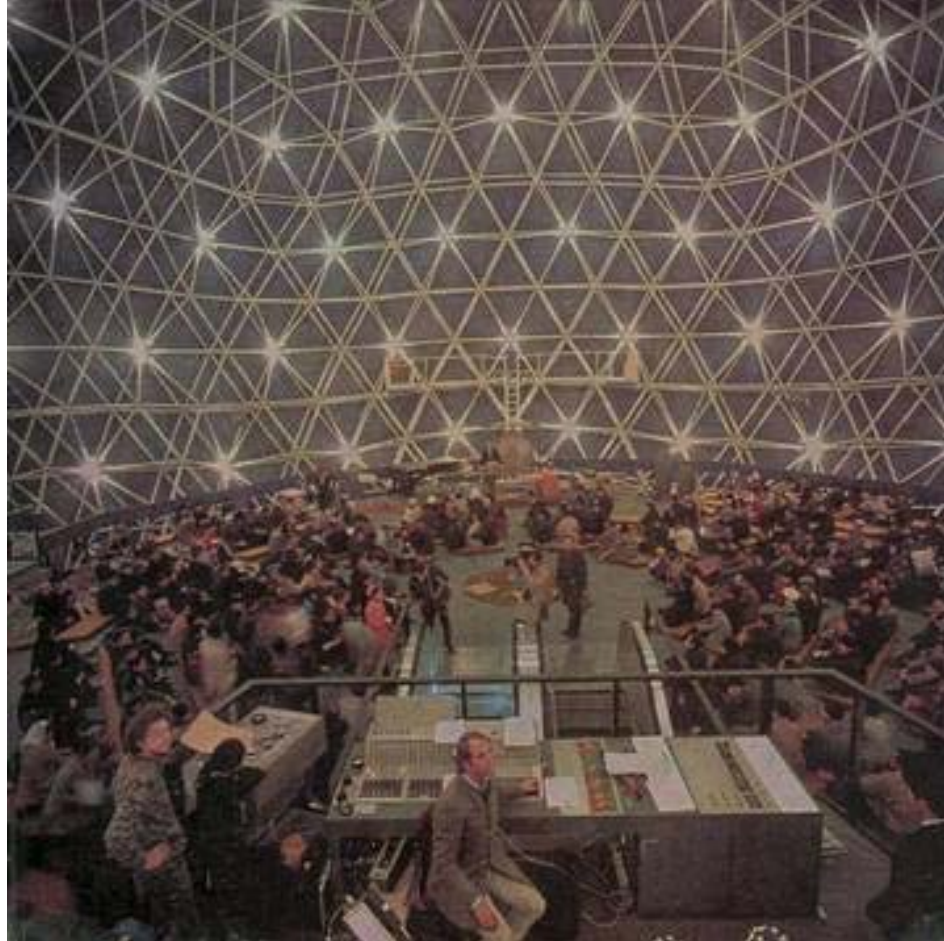


Motivação Musical

Histórico

8

Spiral, K. Stockhausen
(1970)

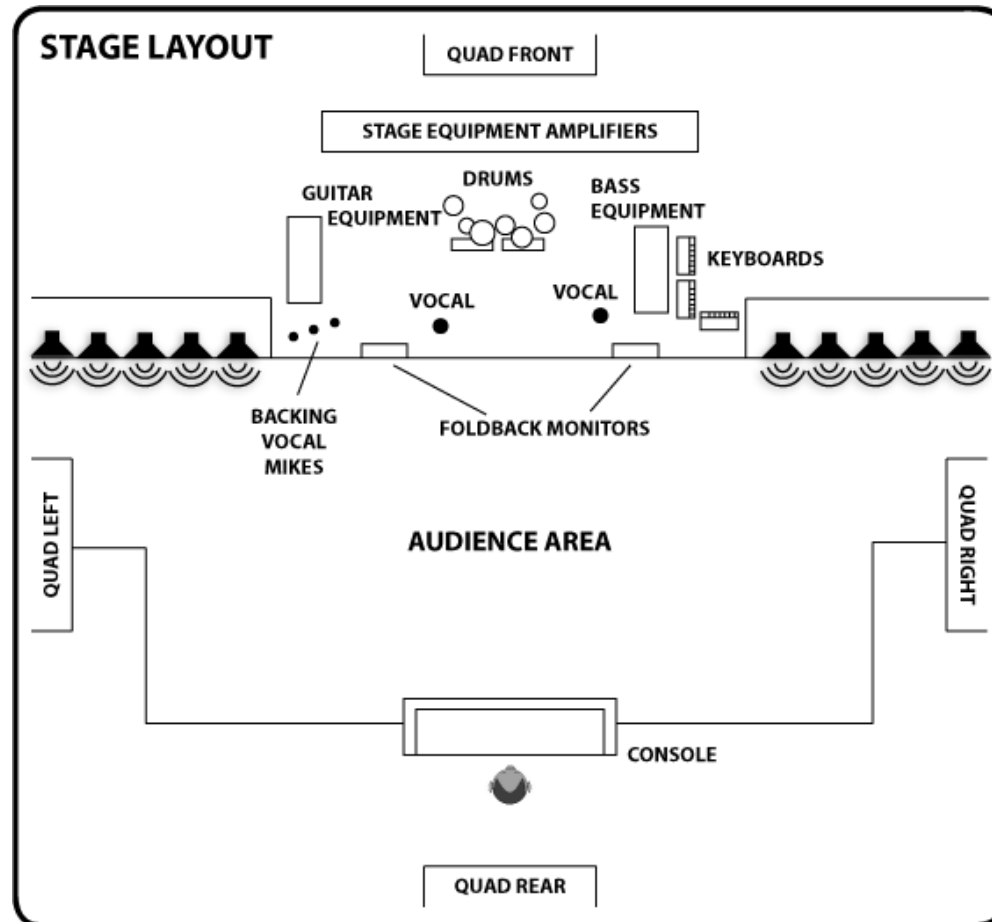


Motivação Musical

Histórico

9

Pink Floyd
(década de 1970)

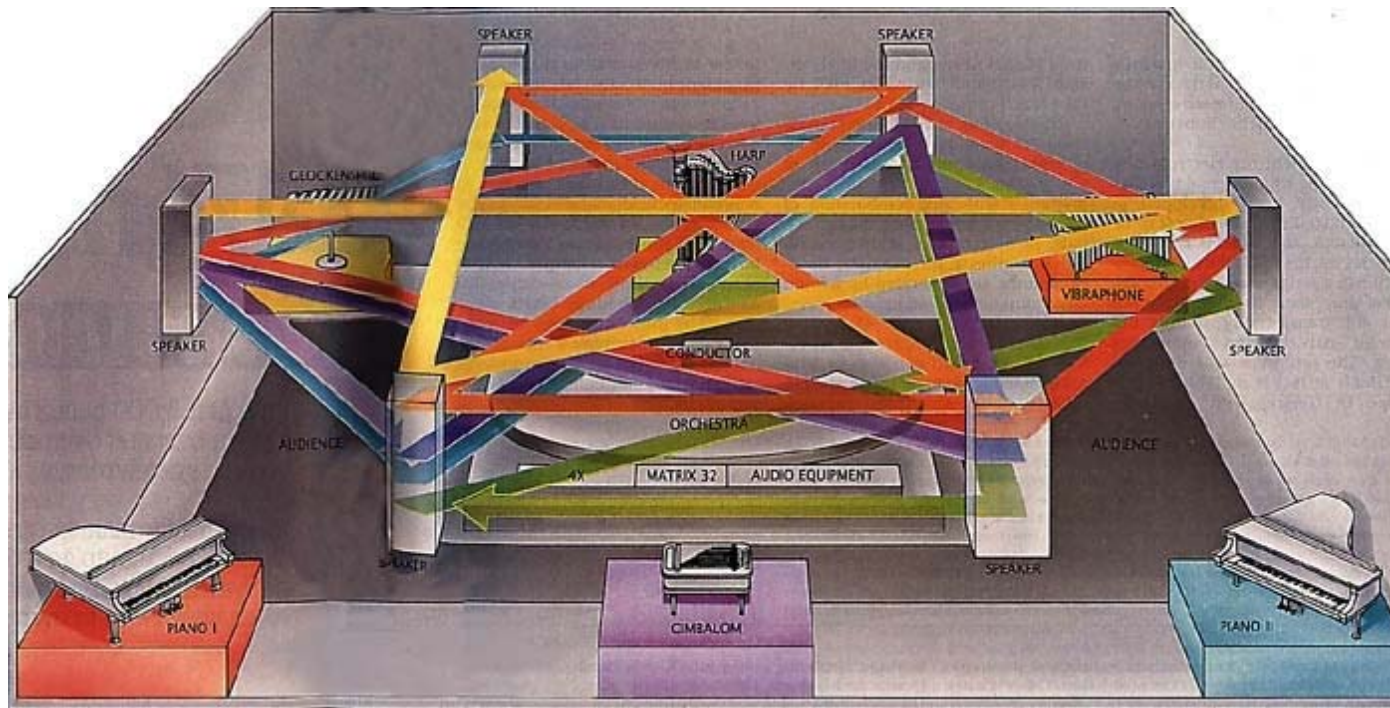


Motivação Musical

Histórico

10

Répons, Boulez
(1985)

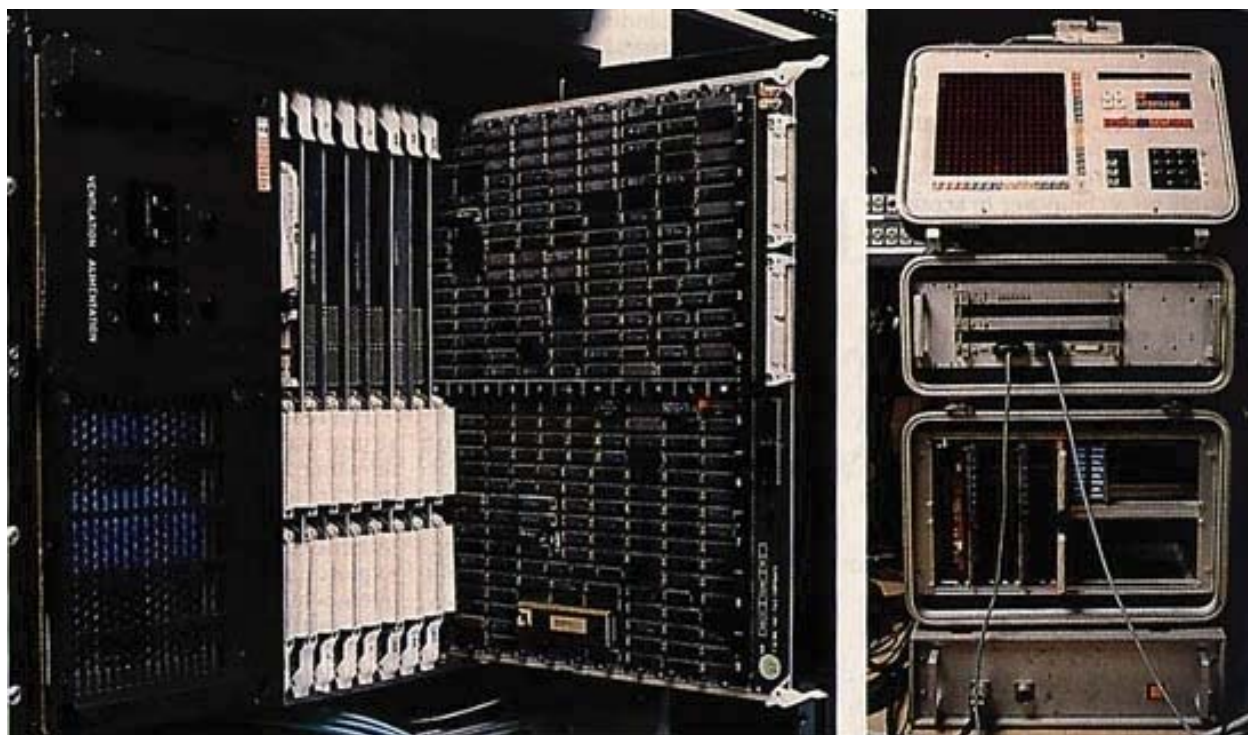


Motivação Musical

Histórico

11

Répons, Boulez
(1985)



Sogitec 4X → 8 processadores digitais de áudio
Matrix 32 → controla o tráfego de áudio

Agenda

12

- Motivação Musical
- **Percepção Espacial**
 - ▣ Como ouvimos?
- Técnicas de Auralização
- *Software* para espacialização
- Casos de Uso em Música

Percepção Espacial

Como ouvimos?

13

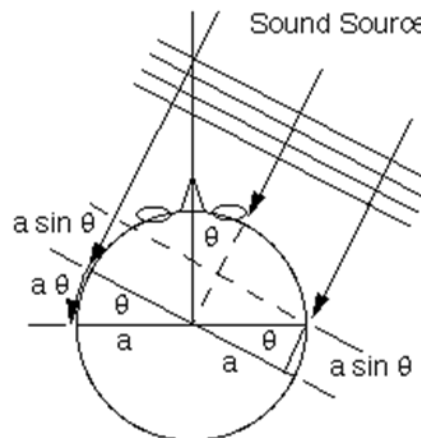
- Diferença Interaural (ILD e ITD)
- Distância da Fonte (Lei do Inverso quadrado)
- Movimento da Cabeça
- Efeito de Precedência
- Efeito Doppler
- E muito mais...

Percepção Espacial

Diferença Interaural

14

- Teoria *Duplex* – Lord Rayleigh (1907)
 - ▣ Como o som de uma mesma fonte sonora chega a cada ouvido
 - ▣ ILD – Diferença de intensidade pd
 - ▣ ITD – Diferença de tempo (fase) pd

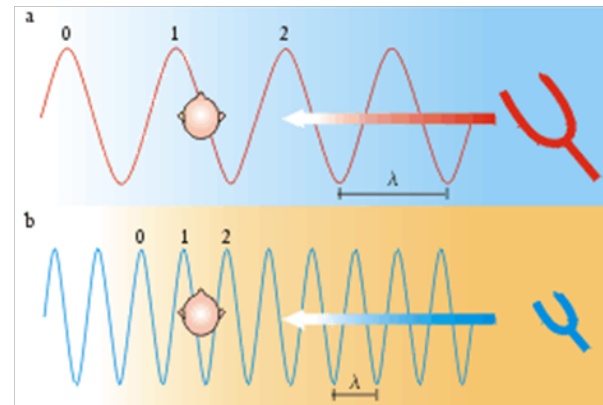
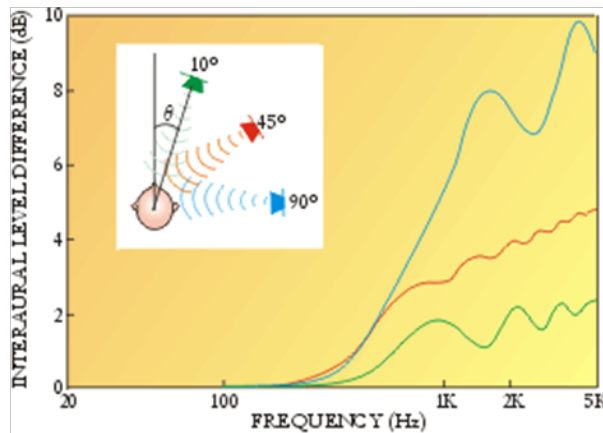


Percepção Espacial

Diferença Interaural

15

- Para sons senoidais
 - ▣ ILD – usada em altas freqüências
 - ▣ ITD – usada em baixas freqüências



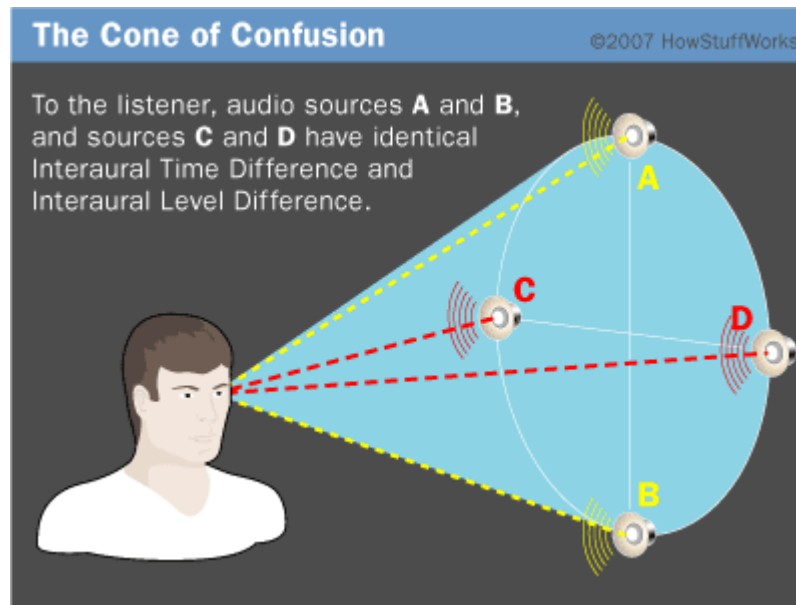
- Não é precisa para sons complexos

Percepção Espacial

Movimento da Cabeça

16

- Cone de confusão
 - ▣ As ITD e IID provenientes de uma certa posição na superfície do cone são iguais
 - ▣ Pode ser resolvida através de movimentos da cabeça



Percepção Espacial

Distância

17

- Importantes em **campo aberto**
- Mudança de intensidade ao andar em direção à fonte da uma dica absoluta da distância → intensidade respeita a lei do inverso do quadrado
- Freqüências altas são mais atenuadas devido à absorção do ar → depende da familiaridade com a fonte, da uma dica relativa da distância
- Julgamentos de distância não são precisos → erros de 20%

Percepção Espacial

Efeito de Precedência

18

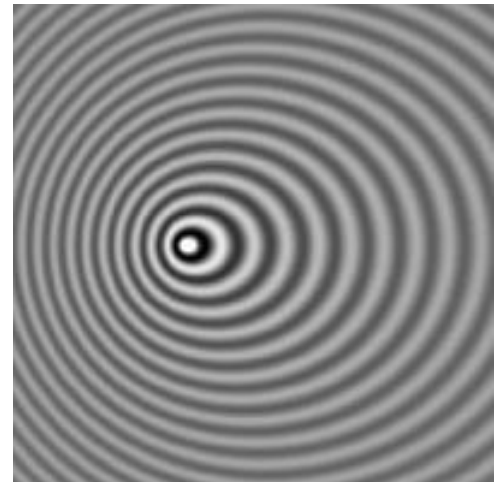
- Importante em **ambientes fechados**
- Dois sons são ouvidos como um se chegam aos ouvidos com uma diferença de tempo pequena (5ms – 40ms)
- Se dois sons são ouvidos como um, a localização é determinada principalmente pela localização do primeiro som a chegar
- Sem ele, seria muito confuso ouvir sons em uma sala reverberante

Percepção Espacial

Efeito Doppler

19

- Frequência percebida aumenta no mesmo sentido que o movimento da fonte e diminui no outro sentido → mudança no comprimento de onda
- Observador na mesma linha do movimento
 - velocidade radial não muda
 - Fonte aproximando → percebe a frequência mais alta
 - Fonte distanciando → percebe a frequência mais baixa
- Se o observador não estiver na mesma linha
 - vel. radial varia com o ângulo entre o observador e a fonte
 - frequência varia de acordo com a velocidade radial



Percepção Espacial

E muito mais...

20

- Outros dicas
 - ▣ Sombra da cabeça
 - ▣ Reflexão nas Aurícula, Ombros, Torso...
 - causa mudança no espectro do som
 - usado para determinar o ângulo vertical
- Sons complexos...

Percepção Espacial

E muito mais...

21

- Afinal, o cérebro usa tudo isso?
 - ▣ Apenas uma dica pode ser suficiente
 - ▣ Uso de várias → pode levar a uma contradição
 - ▣ Sistema de votação!

Agenda

22

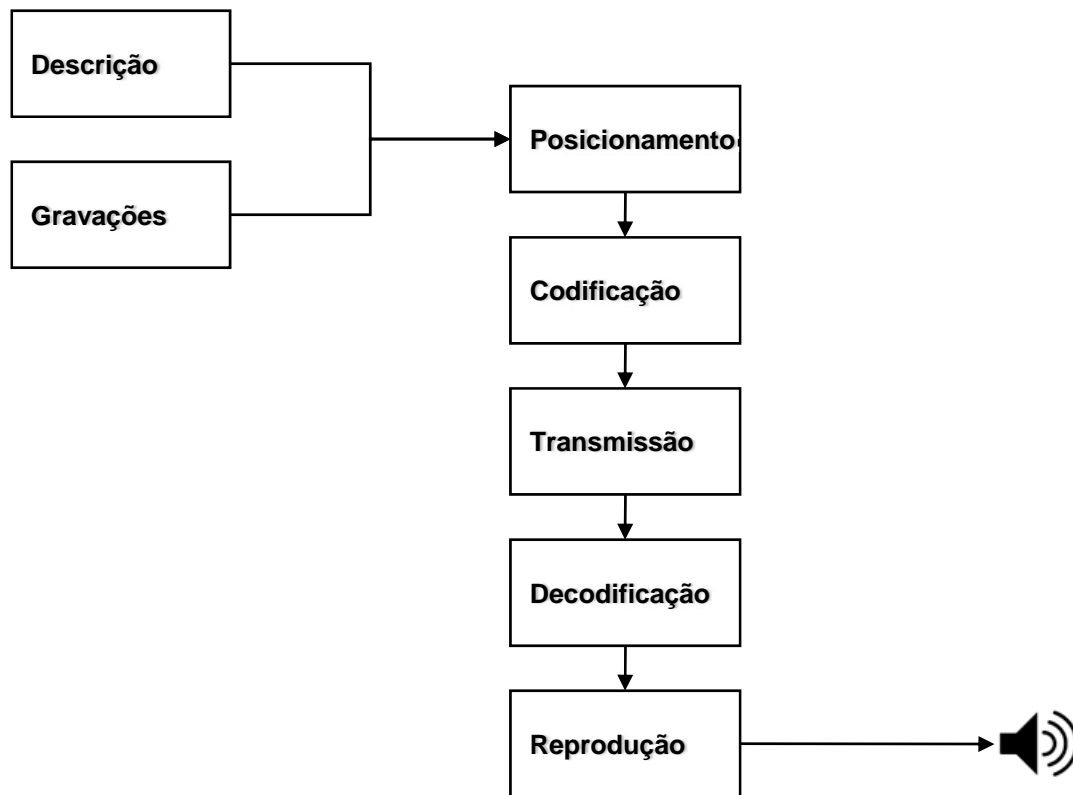
- Motivação Musical
- Percepção Espacial
- **Técnicas de Auralização**
 - ▣ Como simular?
 - ▣ Binaural (HRTF)
 - ▣ Estéreo / Dipolo Estéreo
 - ▣ Dolby 5.1 / DTS
 - ▣ Vector Base Amplitude Panning (VBAP)
 - ▣ Wave Field Synthesis (WFS)
 - ▣ Ambisonics
- Software para espacialização
- Casos de Uso em Música

Técnicas de Auralização

Como simular?

23

- Sistema de Espacialização Genérico (Thomaz, 2007)



Técnicas de Auralização

Como simular?

24

- Aplicações de um sistema de espacialização
 - ▣ Reprodução de peças musicais espacializadas
 - ▣ Experimentos com espacialização orquestral
 - ▣ Produção musical
 - ▣ Ensaaios com orquestra virtual
 - ▣ Som de cinema
 - ▣ Realidade Virtual
 - ▣ Jogos de Computador

Técnicas de Auralização

Como simular?

25

- Inúmeros fatores influem na implementação
 - Objetivo da simulação
 - Ambiente de reprodução acústico
 - Número de pessoas
 - Nível de realismo
 - Equipamento disponível
 - Poder computacional disponível

Técnicas de Auralização

Como simular?

26

- Como?
 - ▣ Simulação dos “cues” humanos
 - Panorama por Amplitude
 - Filas de atraso
 - Filtros
 - ▣ Técnicas de Auralização
 - Binaural
 - Fontes Virtuais

Técnicas de Auralização

Binaural (HRTF)

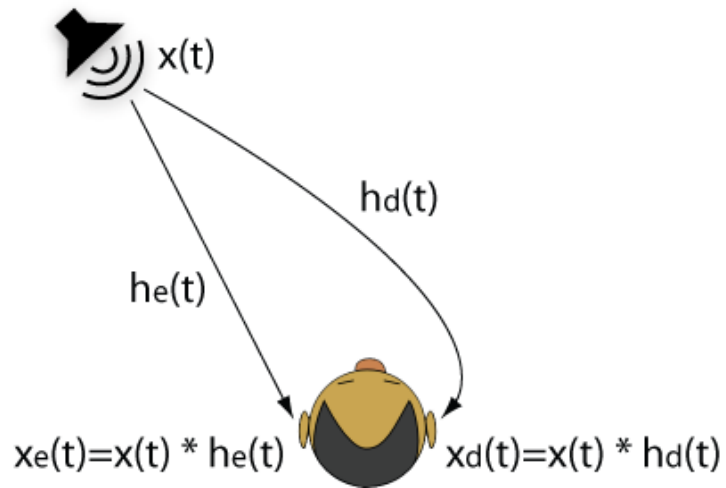
27

- Utiliza o conceito de HRTF (*Head Related Transfer Function*)
 - ▣ representa a transformação que um som sofre desde a fonte sonora até o ouvido (uma resposta impulsiva para cada ouvido)
 - ▣ levantada para várias posições ao redor do ouvinte
 - ▣ posições podem ser interpoladas
 - ▣ geralmente são levantadas através de *Dummy Heads* (bancos de HRTFs disponíveis gratuitamente)
 - ▣ cada ser humano tem sua HRTF, mas HTRFs genéricas dão bons resultados
- Bons resultados com fácil implementação
- Necessita de fones de ouvidos

Técnicas de Auralização

Binaural

28



Funções de transferências dos ouvidos esquerdo e direito



Dummy Head KU100, da Neumann

Técnicas de Auralização

Estéreo

29

- 2 canais, separação de 60° entre os alto-falantes
- Pode ser gravado com microfones (X-Y, A-B, M/S) ou aplicando leis de panorama
- Problemas:
 - ▣ interferência entre alto-falantes (*crosstalk*)
 - ▣ *sweet-spot* mínimo → movimento do ouvinte leva a imagem ao alto-falante mais próximo

Técnicas de Auralização

Dipolo Estéreo

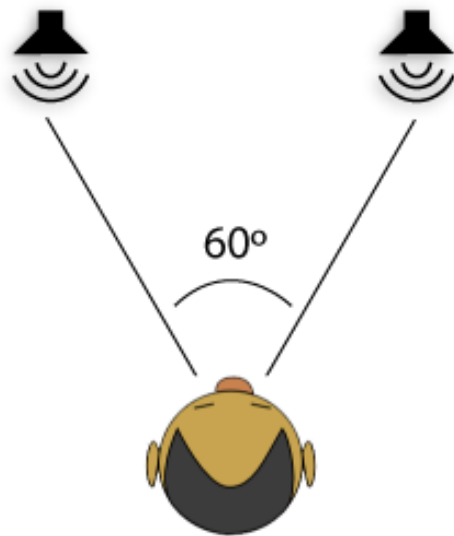
30

- (KIRKEBY; NELSON; HAMADA, 1997)
- Filtros anti-interferências (binaural)
- Separação de 10° entre os alto-falantes
 - ▣ Menor interferência
 - ▣ Filtros anti-interferências mais simples
- Percepção de um campo sonoro mais largo ($\sim 180^\circ$)
- Maior *sweet-spot* → ouvinte tem maior liberdade para movimentos com a cabeça

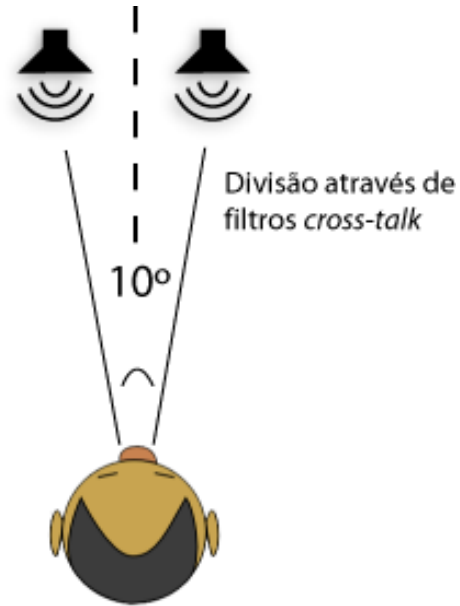
Técnicas de Auralização

Estéreo / Dipolo Estéreo

31



(a) Estéreo



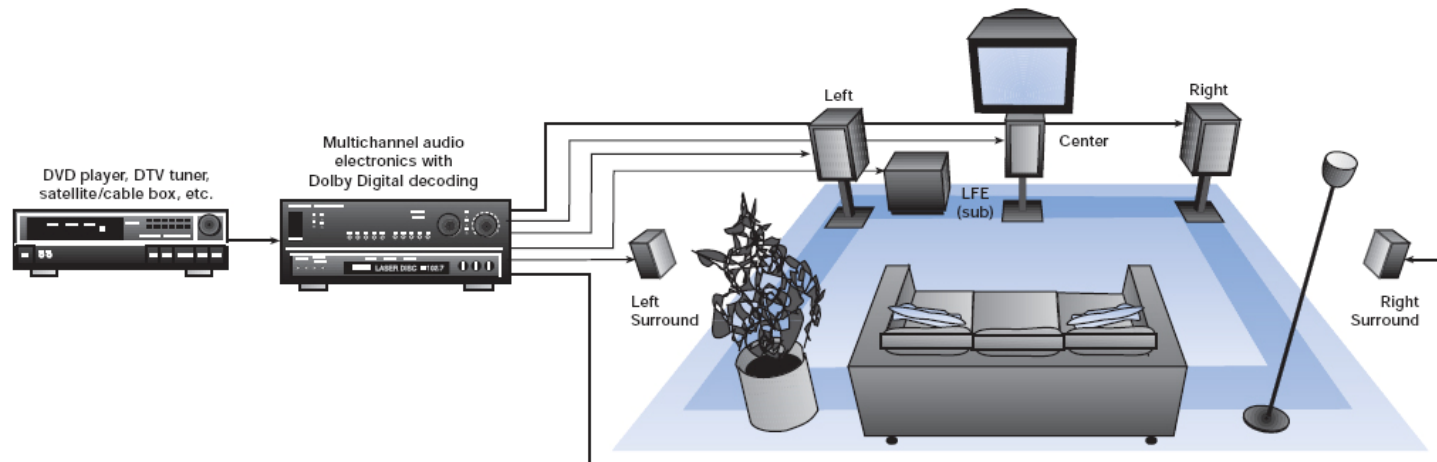
(b) Dipolo Estéreo

Técnicas de Auralização

Dolby / DTS

32

- (DOLBY, 1999)
- padrão de facto de áudio envolvente no mercado
- basicamente, funciona através de panorama por amplitude
- não é possível obter imagens estáveis em torno do ouvinte, principalmente atrás e aos lados



Técnicas de Auralização

Vector Base Amplitude Panning (VBAP)

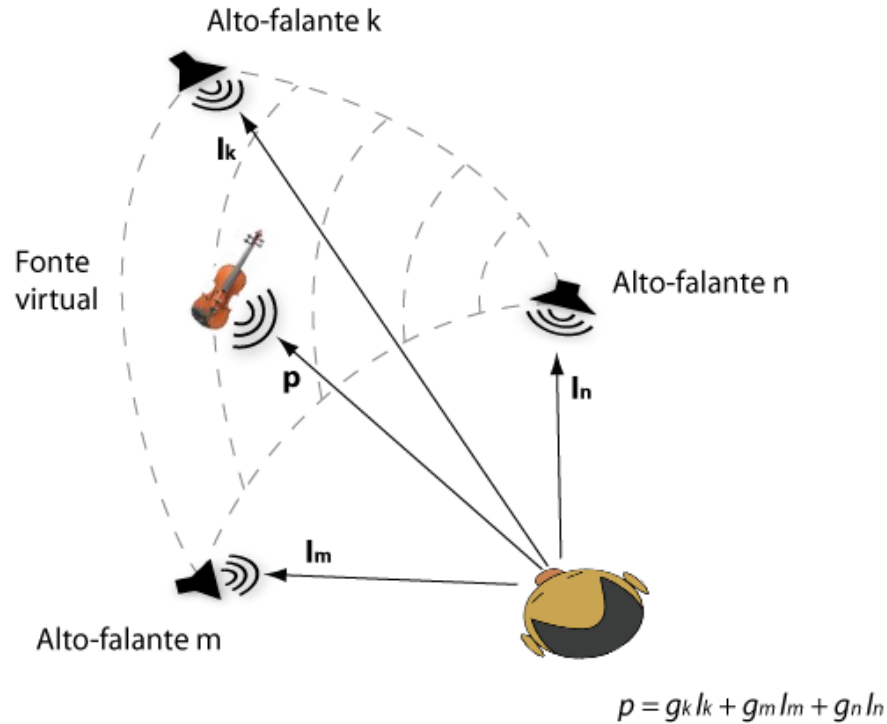
33

- (PULKKI, 2001)
- Baseado em Panorama por Amplitude
- Número flexível de alto-falantes, 2-D ou 3-D
- Utiliza no máximo 3 alto-falantes para posicionar a fonte virtual → triangularização
- Simples implementação → matriz de ganhos
- Bloco Pd disponível (matrix~)

Técnicas de Auralização

Vector Base Amplitude Panning (VBAP)

34



Vetores e posicionamento de alto-falantes no VBAP

Técnicas de Auralização

Wave Field Synthesis (WFS)

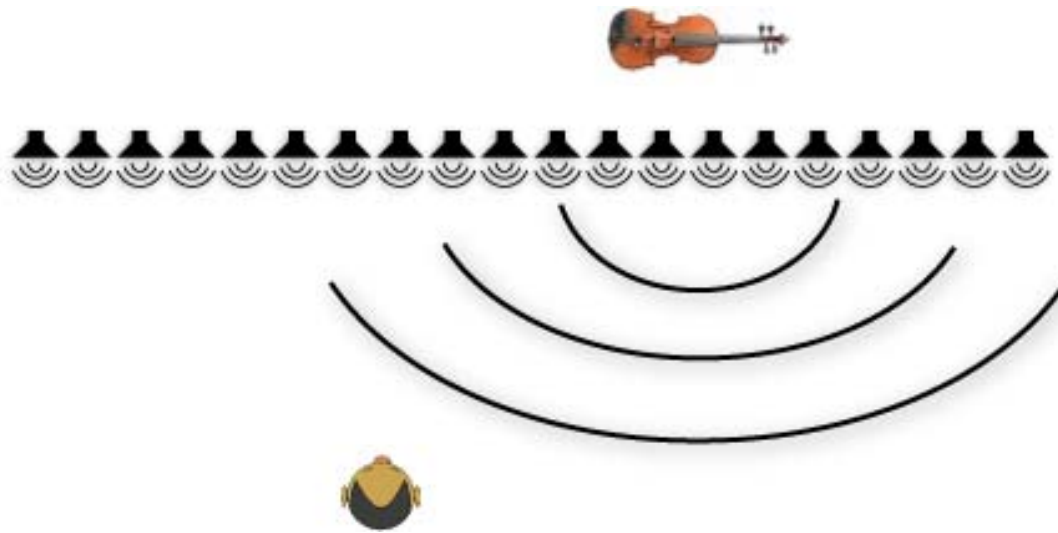
35

- (BERKHOUT, 1988)
- Baseada no princípio de Huygens
 - ▣ cada ponto em uma frente de onda é fonte de uma nova fonte
 - ▣ frente de onda original pode ser considerada como a soma das ondas geradas por cada um desses pontos
- Reconstrução do campo sonora através de uma matriz densa de alto-falantes
- Movimentos do ouvinte não causam mudanças na imagem
- Requer grande poder computacional, montagem custosa

Técnicas de Auralização

Wave Field Synthesis (WFS)

36



Frente de onda reconstruída através de uma matriz densa de alto-falantes

Técnicas de Auralização

Ambisonics

37

- (GERZON,1973)
- Técnica de gravação e reprodução do campo sonoro 3D
- Reconstrução da frente de onda (princípio de Huygens)
- Codificação independente da decodificação
- Flexibilidade na implementação
 - ▣ Ordem Ambisonics
 - ▣ Configuração de alto-falantes

Técnicas de Auralização

Ambisonics

38

□ Codificação

- ▣ Gravação através de um microfone especial

- ▣ Síntese → posicionamento virtual

- Localização

$$W = \sqrt{2} \cdot S$$

$$X = \cos(\phi) \cos(\theta) \cdot S$$

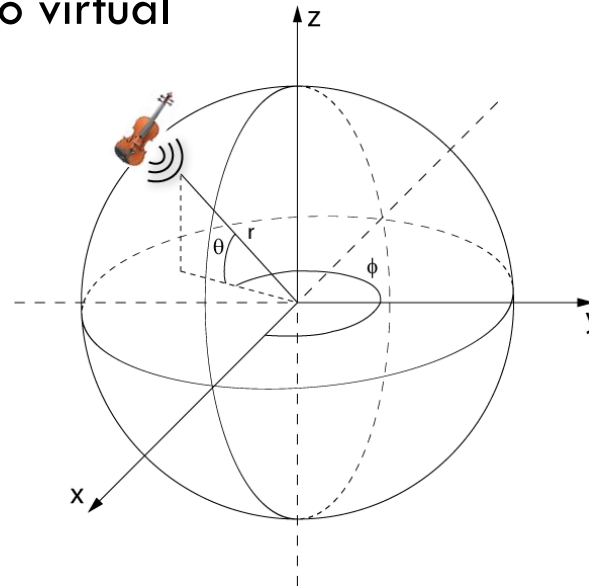
$$Y = \sin(\phi) \cos(\theta) \cdot S$$

$$Z = \sin(\theta) \cdot S$$

- Distância - Intensidade

- Atrasos

- ▣ Manipulação do campo sonoro gravado/sintetizado



Microfone Soundfield™

Técnicas de Auralização

Ambisonics

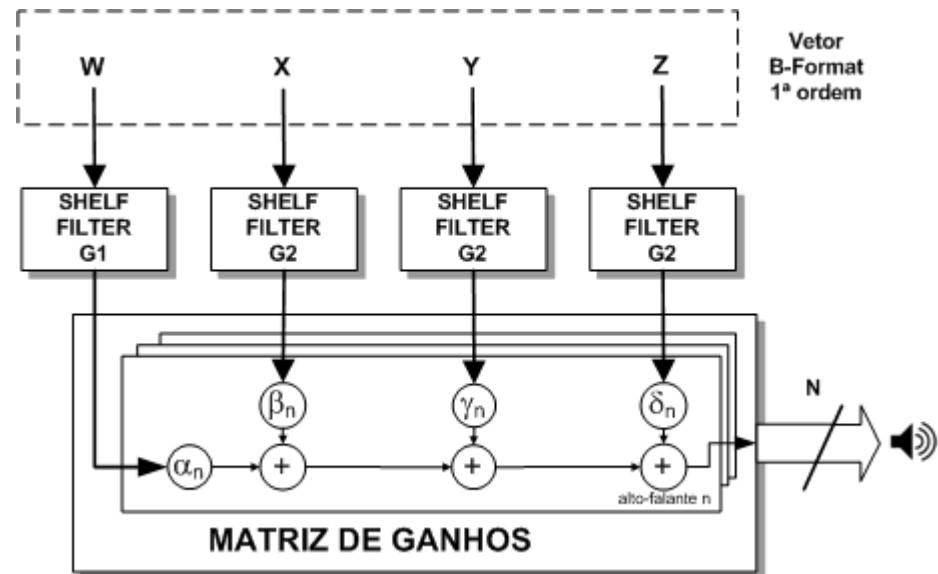
39

□ Decodificação

▣ Matriz de ganhos

- Configurações regulares → solução simples, tabelas prontas
- Configurações irregulares → soluções complicadas

▣ Filtros psicoacústicos

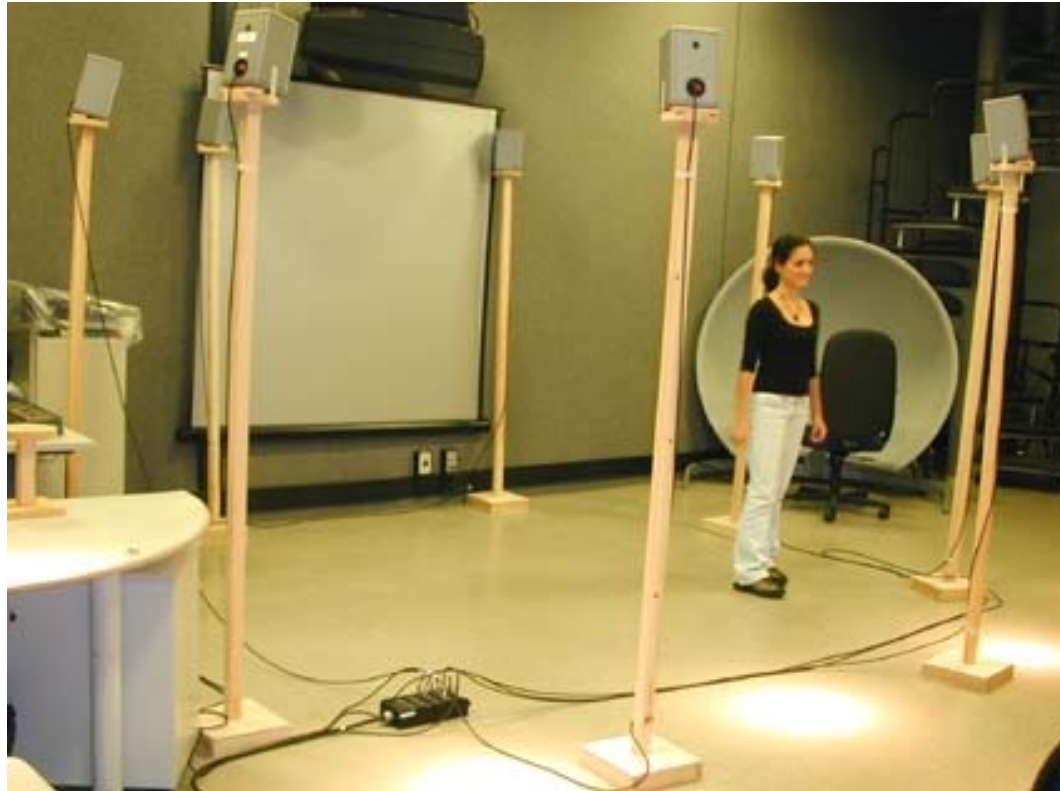


Decodificador Ambisonics de 1ª ordem

Técnicas de Auralização

Ambisonics

40



Configuração octogonal horizontal de decodificação Ambisonics
(Thomaz, 2007)

Técnicas de Auralização

Comparação

41

<i>Técnica de Auralização</i>	<i>Realismo</i>	<i>Número de Usuários</i>	<i>Facilidade de Implementação</i>	<i>Custo Computacional</i>	<i>Custo Equipamento</i>
Dipolo Estéreo	2	1	4	3	4
	Sem os problemas de interferência do estéreo comum, mas só reproduz som frontal	Suporta apenas um usuário	Montagem simples, requer cálculo de filtros	Processamento de filtros anti-interferência	Necessita de apenas dois alto-falantes
Bi-aural	4	1	4	3	5
	Reconstrução da onda boa se forem utilizadas boas HRTFs	Suporta apenas um usuário	HRTFs prontas para utilização. Implementação mais complicada no caso de HRTFs personalizadas	No caso da síntese, exige um processamento razoável	Necessita apenas de fones de ouvido
Dolby / DTS	1	2	5	4	4
	Reconstruã com problemas nas laterais e atrás	Suporta poucos usuários	Codificadores amplamente disponíveis	existem <i>hardwares</i> e <i>softwares</i> específicos	Equipamento 5.1 e <i>receiver</i> amplamente disponível
SVPA	3	4	4	4	3
	Panorama por amplitude, é capaz de reproduzir campos tridimensionais	Suporta vários usuários simultaneamente	Simple implementação computacional, baseada em ganhos	Não requer grande processamento	Depende do número de alto-falantes utilizado
Ambiophonics	3	2	3	5	4
	Boa reconstrução na montagem completa	Suporta até dois usuários	Necessita da implementação do dipolo estéreo e do Ambisonics	Não requer processamento, gravações prontas	Sistema escalável, iniciando em 2 alto-falantes
WFS	5	5	1	1	1
	Reconstrução da onda próxima da realidade	É capaz de suportar muitos usuários simultaneamente sem perda na reconstrução da onda	Montagem complicada	Requer grande processamento se for feita a síntese	Requer uma matriz densa de alto-falantes
Ambisonics	5	4	3	3	3
	Ótima reconstrução da onda para altas ordens	É capaz de suportar vários usuários simultaneamente	Montagem depende do número e disposição dos alto-falantes	Não requer grande processamento	Depende do número de alto-falantes

Agenda

42

- Motivação Musical
- Percepção Espacial
- Técnicas de Auralização
- **Software para espacialização**
 - ▣ SW Comerciais
- Casos de Uso em Música

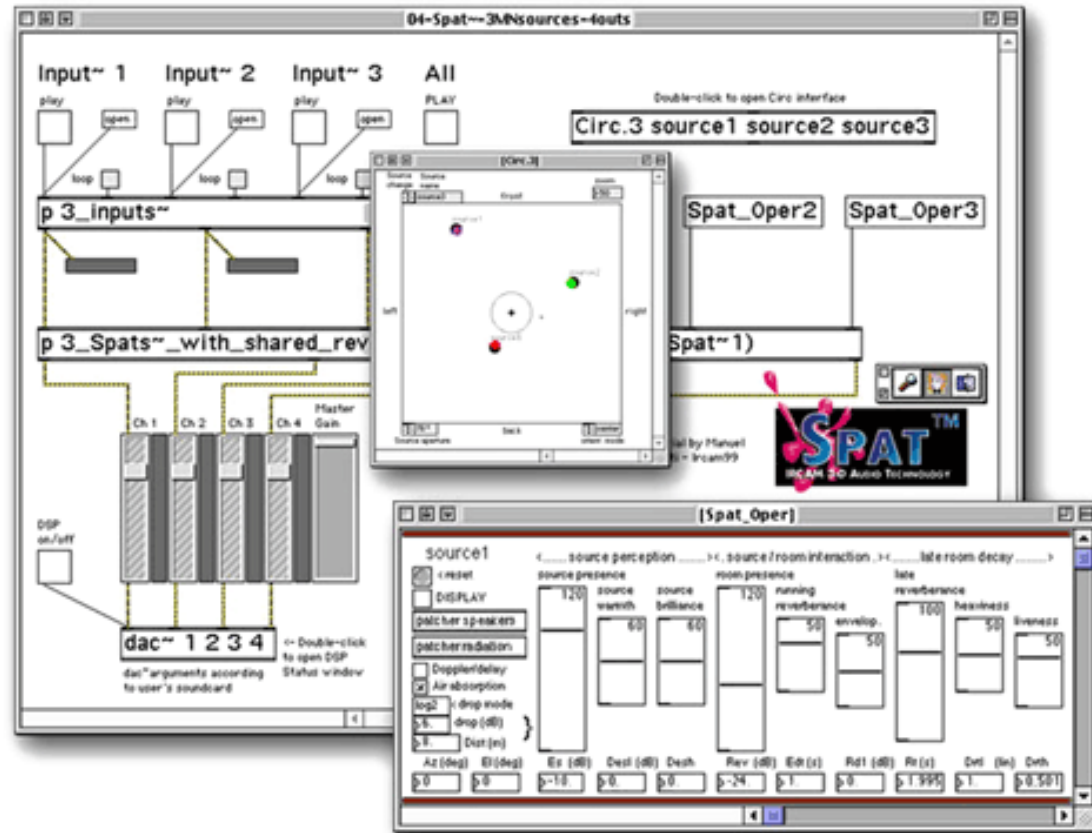
Software para especialização

Spat

43

Spat – IRCAM

Binaural
Panorama
Ambisonics
WFS



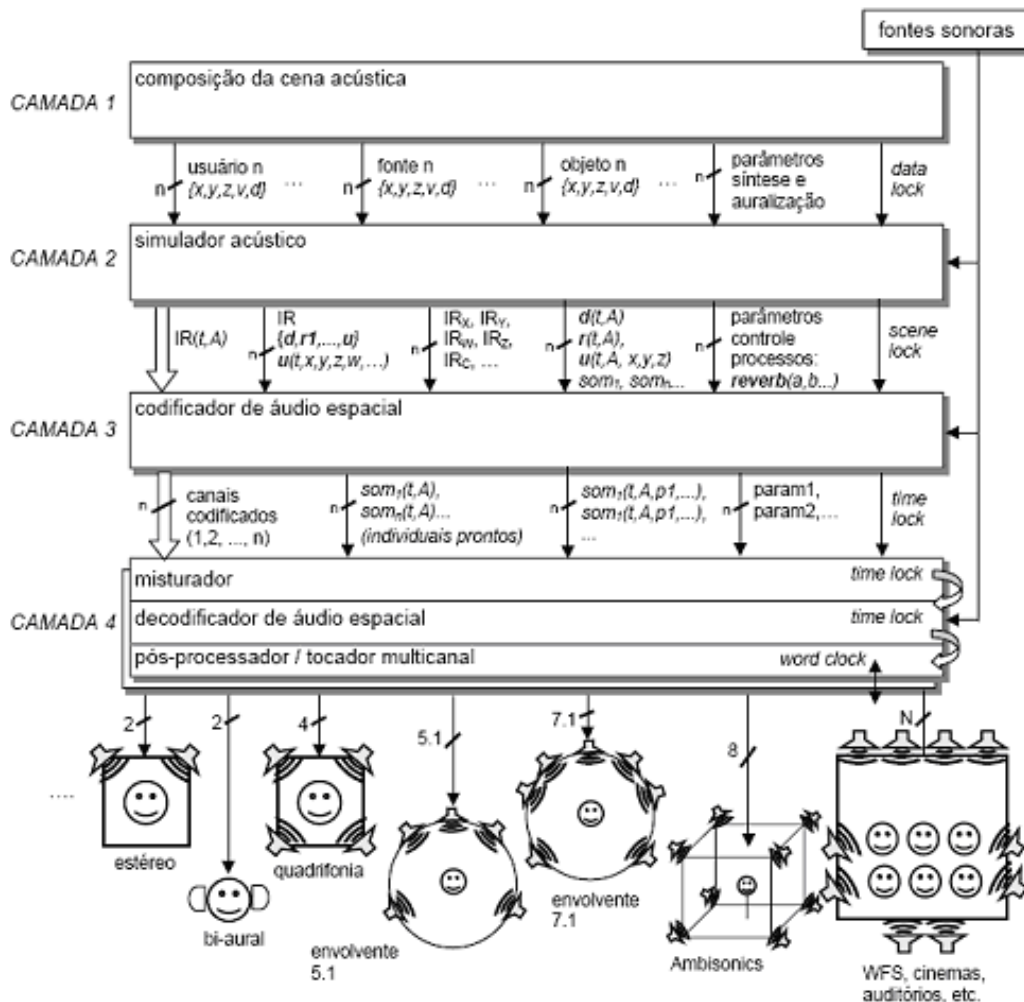
Software para espacialização

AUDIENCE

44

Arquitetura AUDIENCE (FARIA, 2005)

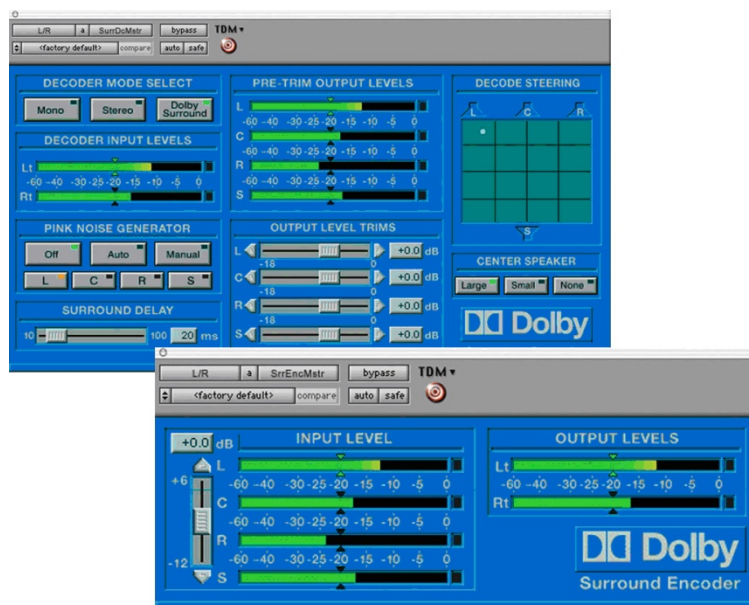
Ambisonics



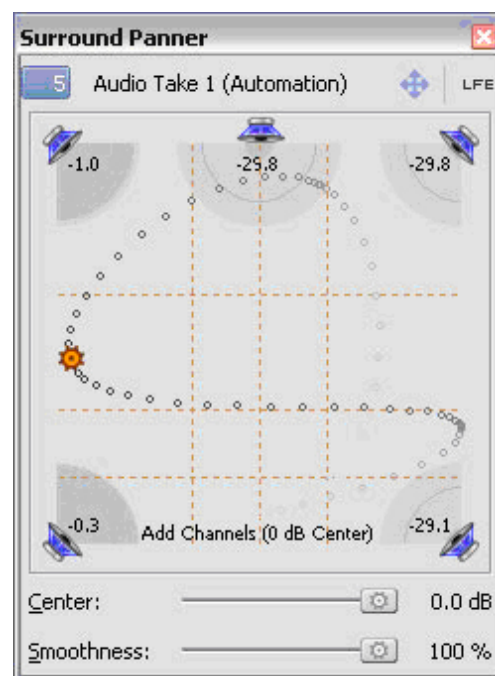
Software para espacialização

Outros

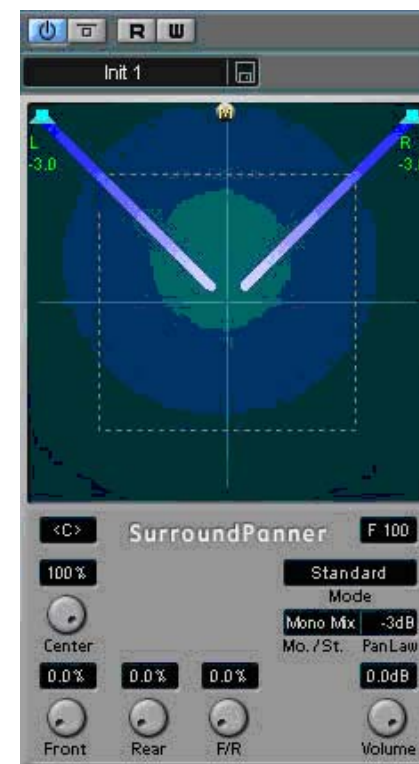
45



Pro Tools Dolby Encode



Sony Vegas 2



Steinberg Nuendo 3

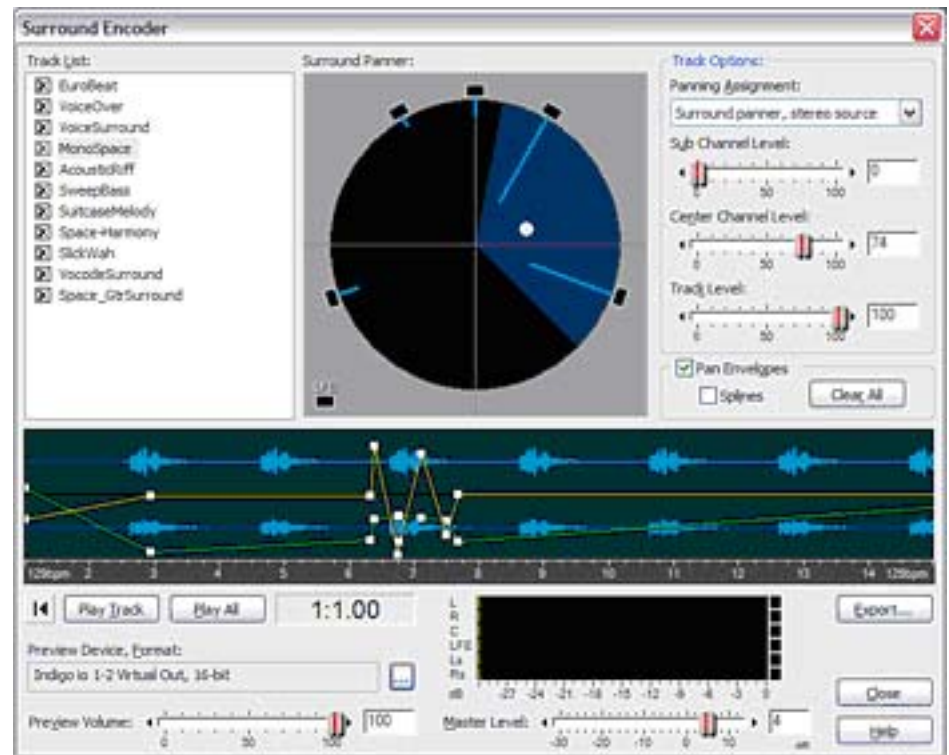
Software para especialização

Outros

46



Waves s360



Adobe Audition

Agenda

47

- Motivação Musical
- Percepção Espacial
- Técnicas de Auralização
- *Software* para espacialização
- **Casos de Uso em Música**
 - ▣ Experimento *The Unanswered Question*

Caso de Uso em Música

Experimento The Unanswered Question

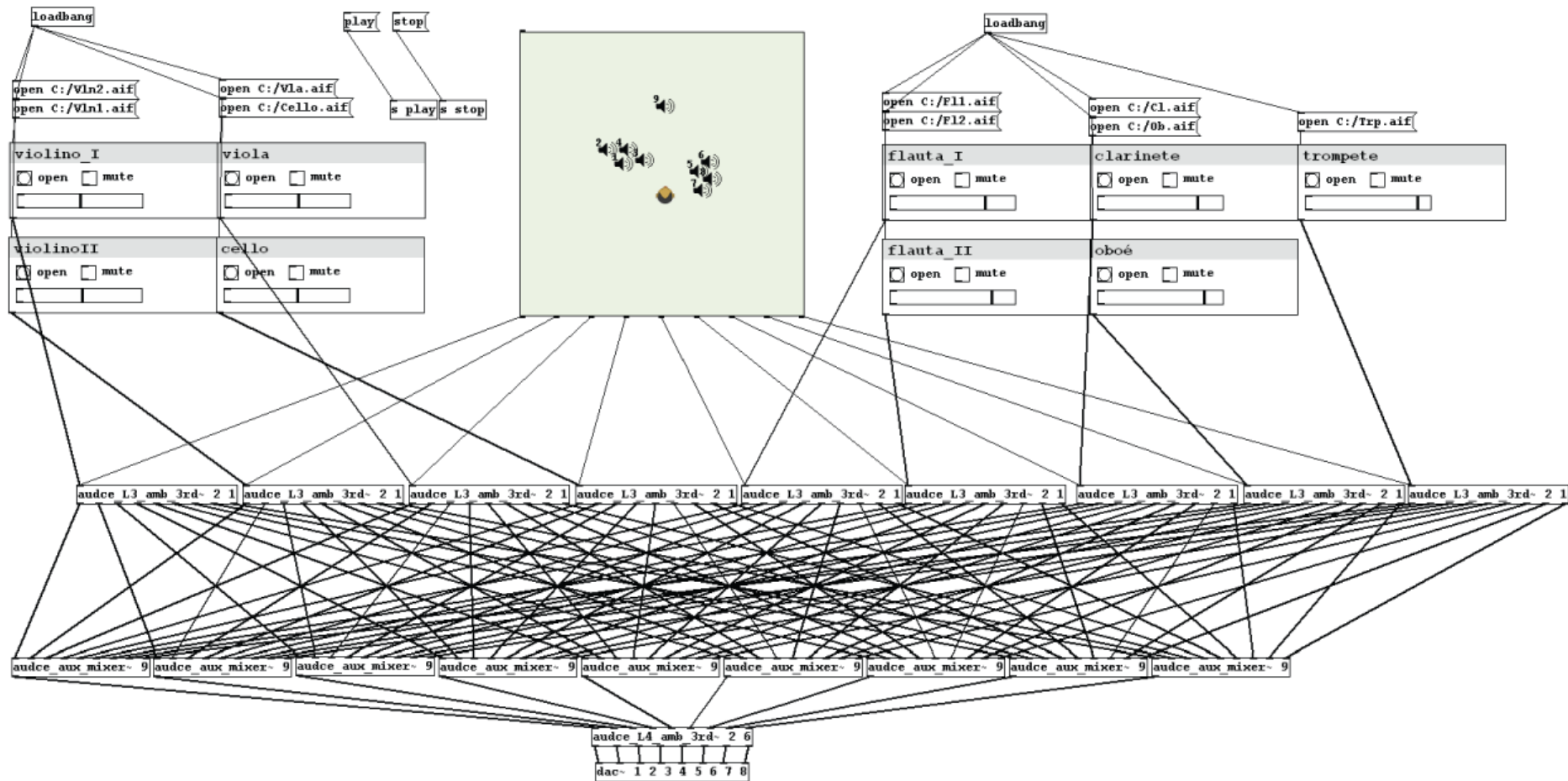
48

- Aplicação à música de um sistema de espacialização sonora baseado em Ambisonics (Thomaz, 2007)
- Baseado na arquitetura AUDIENCE
- Blocos desenvolvidos em Pd:
 - ▣ Simulador Acústico – Fontes Virtuais (Allen, 1979) `audce_L2_allen 1024`
 - ▣ Codificador Ambisonics 3^a ordem `audce_L3_amb_3rd~ 2 1`
 - ▣ Decodificador Ambisonics 3^a ordem `audce_L4_amb_3rd~ 2 1`
 - ▣ Blocos auxiliares e de interface gráfica
- Gravação de *The Unanswered Question*, de Charles Ives
- Montagem do Patch Pd e experimento

Caso de Uso em Música

Experimento *The Unanswered Question*

49



Patch para espacialização da peça The Unanswered Question com nove fontes sonoras

Caso de Uso em Música

Experimento The Unanswered Question

50

- Demonstração!

Referências

- ALLEN, J. B.; BERKLEY, D. A. Image method for efficiently simulating small-room acoustics. **Journal of the Acoustical Society of America**, v.65, n.4, p. 943-950, abr. 1979.
- BLAUERT, J. **Spatial Hearing – The Psychophysics of Human Sound Localization**. MIT Press, 1996.
- BAMFORD, J. S. **An Analysis of Ambisonic Sound System of First and Second Order**. 1995. 270 p. Dissertação (Mestrado) – University of Waterloo. Waterloo, Canada.
- BERKHOUT, A. J. A Holographic Approach to Acoustic Control. **Journal of the Audio Engineering Society**, v. 36, n. 12, p. 977-995, 1988.
- DOLBY LABORATORIES. **Surround Sound - Past, Present, and Future. 1999**. Disponível em: <www.dolby.com/assets/pdf/tech_library/2_surround_Past.Present.pdf>. Acesso em: 15 maio 2005.
- FARIA, R. R. A. **Auralização em ambientes audiovisuais imersivos**. 2005. 191 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo.
- GERZON, M. Periphony: With-Height Sound Reproduction. **Journal of the Audio Engineering Society**, v. 21, n. 1, p. 2-10, jan.-fev. 1973.
- KIM, J. et al. New HRTFs (Head Related Transfer Functions) for 3D Audio Applications. In: AUDIO ENGINEERING SOCIETY CONVENTION, 118., 2005, Barcelona. **Proceedings... Barcelona: AES, 2005**.
- KIRKEBY, O.; NELSON, P. A.; HAMADA, H. The “Stereo Dipole”: Binaural Sound Reproduction using Two Closely Spaced Loudspeakers. In: AUDIO ENGINEERING SOCIETY CONVENTION, 102., 1997, Munich. **Proceedings... Munich: AES, 1997**.

Referências

- MOORE, B. **An Introduction to the Psychology of Hearing**. 5 ed., Academic Press, 2003.
- PULKKI, V. **Spatial Sound Generation and Perception by Amplitude Panning Techniques**. Helsinki: Helsinki University of Technology, 2001. 59 p.
- RUMSEY, F. **Spatial Audio**. Oxford: Focal Press, 2001
- THOMAZ, L. F. **Aplicação à música de um sistema de espacialização sonora baseado em Ambisonics**. 2007. Dissertação (Mestrado), EPUSP, São Paulo.
- TROCHIMCZYK, M. From Circles to Nets: On the Signification of Spatial Sound Imagery in New Music. **Computer Music Journal**, v. 25, n. 4, p. 39-56, inverno 2001.
- ZVONAR, R. A History of Spatial Music. Disponível em: <www.zvonar.com/writing/spatial_music/History.html>. Acesso em: 15 maio 2005.

MUITO OBRIGADO!

lfthomaz@ime.usp.br