



Sociedade de Engenharia de Áudio

Artigo de Congresso

Apresentado no 11º Congresso de Engenharia de Áudio
17ª Convenção Nacional da AES Brasil
7 a 9 de Maio de 2013, São Paulo, SP

Este artigo foi reproduzido do original final entregue pelo autor, sem edições, correções ou considerações feitas pelo comitê técnico. A AES Brasil não se responsabiliza pelo conteúdo. Outros artigos podem ser adquiridos através da Audio Engineering Society, 60 East 42nd Street, New York, New York 10165-2520, USA, www.aes.org. Informações sobre a seção Brasileira podem ser obtidas em www.aesbrasil.org. Todos os direitos são reservados. Não é permitida a reprodução total ou parcial deste artigo sem autorização expressa da AES Brasil.

Aplicação de *Wave Field Synthesis* para Auralização na Música

Marcio José da Silva^{1,2} e Regis Rossi Alves Faria^{2,3}

¹ Universidade de São Paulo, Escola de Comunicações e Artes, Departamento de Música
São Paulo, SP, 05508-020, Brasil

² Lab. de Sistemas Integráveis da USP, Núcleo de Engenharia de Áudio e Codificação Sonora
São Paulo, SP, 05508-010, Brasil

³ Universidade de São Paulo, FFCLRP, Departamento de Música
Ribeirão Preto, SP, 14.040-900, Brasil

marcio.jose.silva@usp.br, regis@usp.br

RESUMO

No contexto integrativo das áreas de música, computação musical e engenharia de áudio, trabalhamos na pesquisa e no desenvolvimento das bases de um sistema de sonorização capaz de criar imagens sonoras espaciais através da aplicação prática da teoria de *Wave Field Synthesis* (WFS), ainda não usada em projetos no Brasil. Esta técnica permite novas perspectivas de escuta através do posicionamento ou da projeção do som de cada fonte sonora (instrumentos musicais e vozes) para que possam ser localizadas em diferentes pontos do espaço auditivo (salas de concerto, auditórios, etc.). Com este mapeamento do espaço de audição seria possível desenvolver aplicações avançadas de instrumentação musical virtual espacial e a modelagem física de espaços de audição, produzindo a sensação de estar em meio a fontes sonoras e, através de aproximações e afastamento das projeções dos sons, ouvi-los com maior ou menor destaque.

0 INTRODUÇÃO

Desde o seu aparecimento, as técnicas de auralização vêm evoluindo e tendem a ter um número cada vez maior de alto-falantes necessários às novas implementações. Isto pode ser observado

comparando-se as diferenças entre alguns sistemas de sonorização, como, por exemplo, o monofônico, o estéreo, o quadrifônico, o surround (5.1, 7.1, etc.) e o Ambisonics [1].

A evolução das técnicas de espacialização de campo sonoro levou à otimização e expansão do uso do espaço

auditivo. Isto tem melhorado com as novas tecnologias de áudio e o aumento do poder de processamento dos computadores, o que sugere buscar explorar todas as possibilidades técnicas possíveis. Como ainda não fora estudada no Brasil, se justifica a pesquisa da *síntese de campo de onda* ou *Wave Field Synthesis*, técnica que utiliza um grande número de canais de áudio, com a perspectiva de que se possa gerar futuras implementações e se possa avaliar a oferta de produtos, fabricados em outros países, que se utilizam desta técnica.

1 SÍNTESE DE CAMPO DE ONDA (WFS - WAVE FIELD SYNTHESIS)

Esta técnica foi introduzida em 1988 por A. J. Berkhout (Universidade TU Delft, Holanda). É baseada na teoria formulada no século XVII pelo físico holandês Christiaan Huygens, tendo como princípio fundamental obter o modelamento físico da propagação de frentes de ondas sonoras através da propagação e superposição de várias pequenas frentes de onda, o que requer uma formulação computacionalmente mais complexa. Em outras palavras, o objetivo principal é emular a frente de onda que seria produzida por objetos sonoros reais em um ambiente acústico específico, através de matrizes de alto-falantes densamente distribuídas na área de audição. Para que isso ocorra, cada alto-falante emite um sinal com um determinado atrasado e com atenuação correspondente à sua posição para contribuir com a síntese de uma fonte virtual.

Na figura 1, é apresentada a criação de imagens sonoras virtuais. Tem-se a impressão que a fonte sonora encontra-se atrás dos alto-falantes:

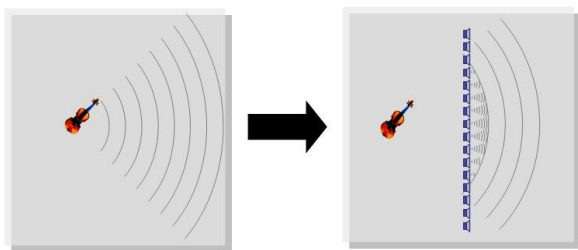


Figura 1: À direita uma fonte sonora gerada por WFS. LIMSI (*Laboratoire d'Informatique pour la Mécanique et les Sciences de l'Ingénieur*) - Augmented and Virtual Reality & Audio Interfaces: <http://www.limsi.fr/Scientifique/aa/thmsonesp/IRVweb>

Nas diversas aplicações de WFS uma das ênfases é que cada ouvinte tenha sempre a mesma sensação de distribuição e percepção das fontes sonoras no espaço de audição. Em outras técnicas, a mudança da posição do ouvinte deve mudar a percepção do ponto onde está localizado o som. Nos sistemas mais usados nas residências (estéreo e home-theaters), para que se possa obter o resultado de espacialização oferecido em cada

um deles, é necessário que o ouvinte se posicione num determinado ponto entre as caixas de som, normalmente ficando numa poltrona fixa. Se várias pessoas estiverem no local, não poderão ficar neste mesmo ponto, não podendo ouvir o resultado da projeção do som da mesma forma. De forma semelhante ao que ocorre com a projeção de imagens nos filmes em três dimensões, a técnica de WFS se diferencia por permitir a localização do objeto em cada ponto do espaço físico, independentemente da posição do ouvinte. Também é capaz de produzir imagens sonoras reais mais definidas e estáveis, formados na frente ou atrás dos alto-falantes. Com WFS é possível simular acusticamente um ambiente, ou sala, virtual com dimensões ajustáveis, através da síntese das reflexões renderizadas, como se as reflexões realmente fossem consequência das paredes virtuais [2]. Para que esta aplicação tenha sucesso, é recomendado o uso de um ambiente de audição que não interfira gerando reflexões, o que atrapalha consideravelmente a percepção da cena sonora.

Para um sistema prático WFS, a projeção do som é feita de forma não contínua, sendo discretizada em função dos alto-falantes que são espaçados de 10 a 20 cm [3].

Ao redor do mundo, existem vários trabalhos acadêmicos que tratam de WFS e já existem empresas comercializando equipamentos e sistemas de sonorização baseados nesta técnica, com destaque para auditórios e salas de cinema na Alemanha, onde se utilizam em torno de 700 ou 800 alto-falantes, mas pode-se conseguir bons resultados de implementação com algo em torno de 30 alto-falantes [1].

A viabilidade da construção de sistemas WFS vem aumentando conforme os computadores mais modernos alcançam maior poder de processamento, permitindo a implementação dos vários canais simultâneos.

1.1 Teoria básica

Quando a distribuição de alto-falantes forma um plano, pode-se aplicar o teorema de Rayleigh. Este teorema diz que, em um ponto (A) em frente ao plano (S), a pressão do som pode ser determinada pela componente normal, a este plano, da velocidade da partícula de ar [4], conforme ilustrado pela figura 2.

A formulação matemática deste problema é dada pela equação (1):

$$P_A = \frac{j\omega\rho}{2\pi} \int_S V_n \frac{e^{-jkr}}{r} dS \quad (1)$$

Onde P_A representa a pressão no ponto A, $j = \sqrt{-1}$, ω é a frequência angular, ρ é a densidade do ar, V_n é a velocidade das partículas de ar e $k = \frac{\omega}{c}$, sendo c a velocidade de propagação do som [4].

2 PROJETOS DE REFERÊNCIA

A seguir são descritos alguns projetos que se utilizaram de *Wave Field Synthesis*.

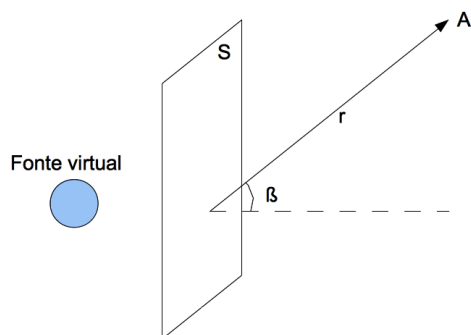


Figura 2: A pressão no ponto A é devida aos alto-falantes alinhados sobre o plano.

2.1 O projeto CARROUSO

CARROUSO (*Creating, Assessing and Rendering in Real Time Of high quality aUdio- viSual enviroNments in MPEG-4 context*) foi um projeto financiado pela Comunidade Européia e realizado de janeiro 2001 até junho de 2003, objetivando, com um sistema WFS, a renderização de cenas sonoras, bem como desenvolver técnicas para gravá-las. Para sua realização juntaram-se empresas privadas e universidades, como Delft University, France Telecom R&D, IRCAM, e Fraunhofer Institute IIS AEMT [5].

2.2 The Game of Life

Em 2006, a fundação holandesa “The Game of Life” desenvolveu um sistema WFS com uma matriz móvel de alto-falantes, conforme pode ser visto na figura 3. Os compositores Barbara Ellison, Yannis Kyriakides e Wouter Snoei criaram peças para este sistema.



Figura 3: Matriz móvel de alto-falantes do *The Game of Life* (agosto de 2007) - [5].

2.3 Casa del Suono

Na Casa del Suono em Parma na Itália, foram instalados dois sistemas baseados em WFS. O primeiro para

equipar um auditório e o segundo foi montado como um lustre, conhecido como Lampadario Acustico (figura 4), usado para colocar fontes sonoras em foco. Martino Traversa compôs uma peça de nome NGC 353 para a inauguração da Casa del Suono [2]. A execução desta composição cria aos espectadores a sensação de que podem tocar os sons que dançam ao redor e acima da cabeça de cada ouvinte [5].



Figura 4: *Lampadario Acustico* - <http://www.danieletorelli.net/lampadario.html>

2.4 WFS do IRCAM

Em 2008, foi instalado no IRCAM (www.ircam.fr) em Paris (França), um sistema WFS equipado com 128 alto-falantes. Este sistema é combinado com um outro sistema para a captura de movimento com câmaras de infravermelhos. Este equipamento é usado para experimentar novos métodos de espacialização para a criação musical e para os experimentos científicos com a realidade virtual e cognição espacial. O IRCAM colaborou com o projeto CARROUSO e nos últimos anos estabeleceu parceria com a empresa suíça Sonic Emotion, para desenvolver sistemas de espacialização baseados em WFS [5].

2.5 WFS da Technical University - Berlin

A *Technical University Berlin* (*TU Berlin*), Alemanha, entre 2006 e 2007 lançou um projeto para equipar um de seus auditórios usando um sistema WFS, com um total de 840 canais de áudio. O sistema é controlado pelo software de código aberto sWONDER, que é abordado na seção seguinte. O programa é controlado via Open Sound Control (OSC), possibilitando a comunicação com outros sistemas, além disso, permite ao usuário definir o movimento das fontes sonoras [6].

2.6 IOSONO

A plataforma comercial IOSONO é o resultado do emprego da técnica de WFS para a sonorização espacial de amplos espaços, como cinemas e teatros. O sistema é o resultado de anos de pesquisa e desenvolvimento de diversas universidades europeias, e foi aperfeiçoado pelo instituto Fraunhofer, da Alemanha. Desde 2003,

há um cinema de 100 lugares em Ilmenau (Alemanha) equipado com 198 alto-falantes. O sistema tem sido também pesquisado para aplicações domésticas (home-theater). No site da empresa pode-se verificar a aplicação feita de um sistema de sonorização que usa tecnologia baseada em WFS, numa versão adaptada da ópera “Neither”, escrita por Morton Feldman and Samuel Beckett [7].

3 SOFTWARES DE REFERÊNCIA

Embora aplicações musicais para WFS sejam ainda incipientes e não haja nenhum sistema implementado no país, a tecnologia vem amadurecendo há mais de uma década havendo algumas distribuições de *software* disponíveis na internet. Como referência para desenvolvimentos futuros, a seguir é feita uma análise de alguns destes programas.

3.1 SSR

O *SoundScape Renderer (SSR)* é um programa usado para reprodução de áudio espacial executado em GNU/Linux e Mac OS X. Foi desenvolvido por Jens Ahrens, Matthias Geier e Sascha Spors, um grupo de pesquisa da Universidade Técnica de Berlim, em colaboração com Telekom Innovation Laboratories. O programa foi escrito em linguagem C++ e também utiliza QT, Python, Puredata. Pode se comunicar em rede usando TCP/IP. O projeto encontra-se na sua 5ª versão (0.3.4), a primeira foi publicada em maio de 2010. Os arquivos para a instalação (de todas as versões), bem como o manual de instruções, encontram-se disponíveis em: <https://dev.qu.tu-berlin.de/projects/ssr/files>.

O SSR têm como propósito ser um *framework* para possíveis implementações de “state of the art” com várias técnicas de reprodução de áudio espacial para uso e pesquisa. Ele é capaz de processar cenas acústicas virtuais usando WFS, reprodução binaural (HRTF), *Ambisonics Amplitude Panning (AAP)*, e *Vector Base Amplitude Panning (VBAP)*. Também pode ser configurado para operar com *array* de alto-falantes linear, retangular ou circular. A escolha da geometria final do sistema e do número de alto-falantes é feita alterando-se um arquivo de configurações, que está num código xml.

Qualquer programa que envia dados de áudio e qualquer entrada do *hardware* de áudio pode ser conectado ao SSR e pode servir como fonte de entrada, em *realtime*. Seu manual recomenda que as conexões de áudio sejam feitas através do *Jack Audio Connection Kit (JACK)*, um programa que, por meio de um servidor de áudio, interliga os programas de áudio e os conecta às entradas e saídas de *hardware* disponíveis. Desta forma, o SSR pode ser interligado a programas como *players* e gravadores, ou a qualquer programa que tenha suporte ao JACK [8].

As imagens dos objetos sonoros podem se formar atrás, em frente ou sobre a matriz de alto-falantes. Pode-se trabalhar com fontes virtuais do tipo pontuais

ou com ondas planas, o que leva a impressão que a objeto está bem distante (no infinito). É possível colocar os objetos sonoros em movimento fazendo o controle através do *mouse* na interface de usuário. A técnica consiste em fazer um *fade out* na posição de origem e um *fade in* na posição de destino. Cenas sonoras estáticas podem ser salvas, porém o mesmo não ocorre com as cenas em que os objetos sonoros se movem.

3.2 sWONDER

O projeto de pesquisa do sWONDER começou em 2003, na TU Berlin, com Marije Baalman [9]. Em 2007, para poder ser instalado e usado com muitos canais num grande auditório na TU Berlin, Alemanha, foi reestruturado por uma equipe de desenvolvedores para se adaptar a grandes instalações ficando com uma estrutura distribuída [6]. O propósito do projeto é servir de ferramenta para para composição musical e apresentações ao vivo.

O programa sWONDER é construído em C/C++, e também se utiliza de QT, para a interface de usuário, patches para Pure Data e VST-plugins. Roda sob a plataforma Linux e é dividido em alguns programas que podem rodar em diferentes computadores e que podem se comunicar em rede, através do protocolo OpenSoundControl (OSC) [6]. Para baixar o sWONDER, deve-se acessar: <http://sourceforge.net/projects/swonder/>.

Pode ser configurado para operar com *array* de alto-falantes linear ou retangular, mas não circular. É necessário modificar os arquivos de configuração para usar o sistema com eficiência. É possível definir parâmetros geométricos da sala virtual que o sistema deve conceber, para que o usuário possa mover fontes virtuais dentro da região definida. Isto também permite aos usuários simular as reflexões do som nas paredes da sala virtual.

Assim como ocorre no SSR, o sWONDER opera em *realtime* e é controlado via JACK. Para diversas funções, como gravação e reprodução de áudio em múltiplos canais, o manual do *software* sugere a utilização do programa Ardour, uma estação de trabalho de áudio digital multicanal.

É possível escolher entre fontes virtuais pontuais ou ondas planas com direção definida, normalmente usadas para sintetizar as reflexões secundárias, pulando as primeiras reflexões. As imagens dos objetos sonoros podem se formar atrás, em frente ou sobre a matriz de alto-falantes. O controle do movimento dos objetos sonoros é feita via *mouse* interagindo com a interface de usuário, com a vantagem de poder optar entre o modo *fade out* na posição de origem e um *fade in* na posição de destino ou o modo que tenta movimentar continuamente o objeto, simulando o efeito Doppler. Tanto as cenas sonoras estáticas como as que têm objetos móveis podem ser salvas.

3.3 WFS de Daniel Salvador

Através de um contato por e-mail, o ex-pesquisador da *Universidad de San Martín de Porres (USMP)*, Peru, César Daniel Salvador Castañeda, cedeu o código-fonte do sistema de WFS, todo desenvolvido por ele na linguagem de programação *Pure Data* (o que facilita a utilização de múltiplos canais). O sistema foi projetado para um arranjo de 35 alto-falantes dispostos em um círculo horizontal de 1,5 m de raio [10]. Não é difícil alterar os parâmetros do programa, desde que a configuração seja sempre circular. Outro tipo de configuração, como a linear, precisa de modificações em quase todo o código e, provavelmente, alguns acréscimos em sua estrutura. O programa é totalmente experimental, ainda não tem manual de instruções e quase não existem comentários em seu código-fonte. Também vêm incluídos arquivos de áudio a serem renderizados para espacializar o áudio correspondente com modelos de ondas esféricas ou planas.

O programa tem vários *patches*, o principal tem a interface de controle que pode ser controlada via *mouse*.

Foram feitas algumas alterações para que o programa funcionasse com 6 alto-falantes dispostos em uma circunferência de raio 0,5 m. Com o uso de arquivos de áudio disponibilizados juntos com código-fonte, foram feitos testes iniciais, percebeu-se que existia apenas um efeito de “panning” entre as caixas, o que provavelmente era consequência do grande espaçamento entre os alto-falantes. Para um futuro breve, estão previstos testes adicionais com mais caixas acústicas à disposição.

4 APLICAÇÕES DE WFS NA MÚSICA

A espacialização sonora por WFS pode ser aplicada para aumentar as possibilidades de abstração nas composições musicais. Pode ser utilizada em conjunto com imagens ou objetos móveis, ou ainda como uma nova forma de objeto sonoro, conceito proposto por P. Schaeffer, em 1966 [11].

Cada maestro ou músico teria a opção de realizar ensaios em meio à orquestras virtuais. A separação dos instrumentos no espaço, que é parcialmente percebida em gravações feitas em estéreo, poderá auxiliar o trabalho de maestros, arranjadores e compositores, pois ajuda a discriminar o som de cada instrumento, mesmo quando vários deles são ouvidos simultaneamente. A expectativa é tornar o mais realística possível a escuta das grandes orquestras.

É adequada para situações de concertos, pois, diferentemente das outras técnicas, tem a capacidade em induzir a percepção de objetos sonoros localizados numa grande área de audição, podendo assim atender um maior número de ouvintes simultaneamente [2].

Em relação à outras técnicas de auralização, *Wave Field Synthesis* permite outros tipos de movimento das fontes sonoras, tais como movimentos que usam controle mais preciso sobre a localização de fontes de som

e movimentação através do espaço de audição. Pode haver uma fonte com uma posição fixa ou uma fonte que se move quando o ouvinte atravessa a região de audição [2].

Com a telepresença (transmissões audiovisuais imersivas à distância) haveriam concertos com a participação de músicos distantes entre si, como se estivessem integrados na mesma sala tocando lado a lado. Cada compositor, arranjador ou produtor em estúdio de gravação poderia pensar os arranjos e orquestrações em função da posição em que gostaria que cada som fosse reproduzido.

4.1 Projetando instrumentos virtuais

A execução musical é uma maneira pela qual os compositores transmitem suas idéias, em princípio abstratas, a outras pessoas. Para a criação de músicas cada vez mais elaboradas e complexas, foi necessário o desenvolvimento, dentre outras coisas, da técnica dos executantes e de instrumentos musicais de construção cada vez mais complexa para aumentar a qualidade e a gama de timbres disponíveis para os arranjos ou orquestrações. Nota-se assim que o estudo e o desenvolvimento tecnológico foram importantes para a evolução da música, principalmente em relação aos instrumentos musicais.

Nas últimas décadas, os músicos usam o computador como uma poderosa ferramenta de composição, como executante e como instrumento gerador dos sons (síntese ou utilização de amostras gravadas).

Com o desenvolvimento das tecnologias de áudio espacial, os instrumentos musicais podem ser percebidos como projeções acústicas, fugindo da lógica da acústica imposta pelo corpo dos instrumentos acústicos tradicionais e trazendo a ilusão da mudança de posição do instrumento real. A modelagem do espaço em instrumentação musical espacial pode ser feita pensando o espaço como um instrumento de execução musical, ou como uma matriz de escuta de domínio do ouvinte.

Ainda pouco explorada, a criação de instrumentos musicais virtuais espaciais, se apresenta como uma das aplicações musicais mais interessantes e desafiadoras para WFS. Pode ser caracterizada pela manipulação e distribuição espacial de cenas de som virtuais, através do controle de alguns parâmetros. Uma ideia possível é gerar e manipular a projeção espacial do instrumento musical virtual em um ambiente físico real, mudando a percepção de tamanho e da forma do seu corpo [12]. Outra ideia é usar um mapeamento controlável, de modo a poder alterar parâmetros como a frequência, a intensidade ou a posição dos sons emitidos. Estamos avaliando como o movimento de partes do corpo poderia controlar estes parâmetros, através de determinados gestos em regiões pré-estabelecidas do espaço (região espacial de execução).

5 LIMITAÇÕES DE WFS

Acima de uma certa frequência ocorre uma distorção com relação à espacialização do som sintetizado ("aliasing"). A frequência de *aliasing*, ou a frequência máxima de operação, é determinada pela diferença máxima de tempo entre a viagem do som de um alto-falante a um ouvinte e a viagem de outro alto-falante ao mesmo ouvinte, incluindo os atrasos necessários para que ocorra a síntese WFS. Distâncias pequenas entre os cones dos alto-falantes possibilitam trabalhar com frequências de *aliasing* mais altas, o que é importante para que possam ser ouvidos os sons de instrumentos de registros bem agudos.

A reprodução de som em WFS trabalha com uma banda de frequências, que tem limite superior imposto pelo aparecimento de *aliasing*, e limite inferior não muito baixo, determinado pela pequenas dimensões dos alto-falantes usados nesta técnica.

Em WFS, considerando que o ouvinte está em frente à matriz de alto-falantes, a fonte sonora deve ser renderizada atrás da matriz, sobre ela ou entre ela e o ouvinte. Por esta limitação, é determinada, em função do ouvinte, a *linha de referência* que serve para determinar até onde o sistema precisa projetar o objeto sonoro.

A implementação do sistema pode acabar custando caro já que exige um grande número de canais de áudio, conseqüentemente exigindo mais recursos de *hardware*, como interfaces de áudio e um grande número de alto-falantes.

6 CONCLUSÕES

A pesquisa em curso mostra novas possibilidades para aplicações de WFS no universo do áudio e da música. Os programas discutidos na seção 3, se mostram no mínimo interessantes em se tratando de aplicações em auralização espacial. Inicia-se um longo, porém promissor, trabalho para a realização prática de aplicações de WFS no universo musical e em áreas correlatas. Nos interessa a facilidade de uso desta técnica para modelagem da fonte sonora (instrumento), a possibilidade de conectar o algoritmo de WFS a algoritmos de simulação acústica, e a possibilidade de usufruir da estabilidade da imagem sonora produzida em vários pontos de escuta simultaneamente (diferentemente do que ocorre nos formatos limitados a *hot-spots*, como Ambisonics).

Estamos desenvolvendo um arcabouço de referência novo para aplicação de WFS na auralização musical, focalizando na construção de cenas sonoras musicais dentro do *framework* do sistema de auralização AUDIENCE e testes de implementação desta técnica são previstos nos próximos meses, após conseguir o incremento de recursos técnicos necessários à continuidade pesquisa, como um maior número de caixas de som, dentro do contexto do projeto MÓBILE [13]. Espera-se explorar ao máximo a WFS, considerando suas limitações, principalmente aquelas

relacionadas ao seu setup de sonorização, como o *aliasing*, pesquisando-se as alternativas técnicas a estas limitações.

AGRADECIMENTOS

À FAPESP pelo apoio financeiro e institucional, através dos processos 2012/17263-1 e 2008/08632-8 (Projeto Temático MÓBILE). Agradecemos ainda a Thilo Koch, pesquisador neste projeto no NEAC-USP (Núcleo de Engenharia de Áudio e Codificação Sonora) pela contínua colaboração e informações teóricas e práticas acerca de WFS.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] L. F. Thomaz, *Aplicação à Música de um Sistema de Espacialização Sonora Baseado em Ambisonics*, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2007.
- [2] M. A. J. Baalman, *On Wave Field Synthesis and The Electro-Acoustic Music: State of The Art 2007*, International Computer Music Conference 2007, 2007.
- [3] Edo M. Hulsebos, *Auralization using Wave Field Synthesis*, Ph.D. thesis, Delft University of Technology, Delft, Holanda, 2004.
- [4] Diemer de Vries, *Wave Field Synthesis. AES Monograph*, AES, New York, 2009.
- [5] M. A. J. Baalman, *On Wave Field Synthesis and electro-acoustic music, with a particular focus on the reproduction of arbitrarily shaped sound sources*, Ph.D. thesis, Technischen Universität Berlin, 2008.
- [6] M. A. J. Baalman; T. Hohn; S. Schampijer; T. Koch, *Renewed architecture of the sWONDER software for wave field synthesis on large scale systems*, Linux Audio Conference, março de 2007.
- [7] IOSONO: the future of spatial audio, <http://www.iosono-sound.com/>, acesso em 16/07/2012.
- [8] J. Ahrens; M. Geier; S. Spors, *Introduction to the SoundScape Renderer (SSR)*, Quality and Usability Lab Deutsche Telekom Laboratories Technische Universität Berlin, novembro de 2012.
- [9] M. A. J. Baalman, *Application of Wave Field Synthesis in electronic music and sound installations*, Linux Audio Conference, abril de 2004.
- [10] César D. Salvador, *Discrete Driving Functions for Horizontal Reproduction Using Wave Field Synthesis and Higher Order Ambisonics*, Audio Engineering Society Convention 129, novembro de 2010.

- [11] P. Schaeffer, *Traité des objets musicaux*, Éditions du Seuil, 1966.
- [12] Regis R. A FARIA, *The tempered space on the design of spatial musical instruments*, Anais do 18th International Congress on Sound and Vibration, International Institute of Acoustics and Vibration, Rio de Janeiro, 2011.
- [13] MOBILE: Processos Musicais Interativos, <http://www.eca.usp.br/mobile/portal/>, acesso em 16/02/2013.