

Reverberação como ferramenta técnica e estética: breve histórico e desafios de seu uso em áudio multicanal

MODALIDADE: COMUNICAÇÃO

SUBÁREA: Composição e Sonologia

Fellipe M. Martins
Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)
fmartins@ufmg.br

Sérgio Freire
Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)
sfreire@musica.ufmg.br

Resumo. A experiência sensorial de espaços acústicos é multimodal e o campo sonoro gerado nesses ambientes é extremamente complexo. A reverberação é o fenômeno dominante nessas situações, sendo que duas principais perspectivas de produção de reverberação artificial se destacam historicamente: uma visa, como ferramenta técnica, recriar o fenômeno de modo a alcançar uma simulação fidedigna de campo sonora e a outra faz uma abordagem criativa utilizando a reverberação como elemento abstrato do campo sonoro, não necessariamente realista e figurativo. Tendo em vista os desdobramentos do áudio multicanal, o artigo faz um breve histórico da reverberação artificial apontando seus usos de acordo com os diferentes sistemas e mostrando os vários desafios existentes.

Palavras-chave. Reverberação, Áudio multicanal, Ambisonics, Difusão sonora, Áudio espacial.

Reverberation as a technical and aesthetic tool: brief history and challenges of its use in multichannel audio

Abstract. The sensory experience of acoustic spaces is multimodal and the sound field generated in these environments is extremely complex. Reverberation is the dominant phenomenon in these situations, and two main perspectives of artificial reverberation production stand out historically: one aims, as a technical tool, to recreate the phenomenon in order to achieve a reliable simulation of the sound field and the other takes a creative approach, using reverberation as an abstract element of the sound field, not necessarily realistic and figurative. Bearing in mind the developments of multichannel audio, the article makes a brief history of artificial reverberation, pointing out its uses according to different systems and showing the various existing challenges.

Keywords. Reverberation, Multichannel audio, Ambisonics, Sound diffusion, Spatial Audio.

Introdução

Ao longo do desenvolvimento do aparato eletroacústico para gravação e (re)produção de som no século XX, o fator *espaço* foi menos examinado e expandido em relação a fatores

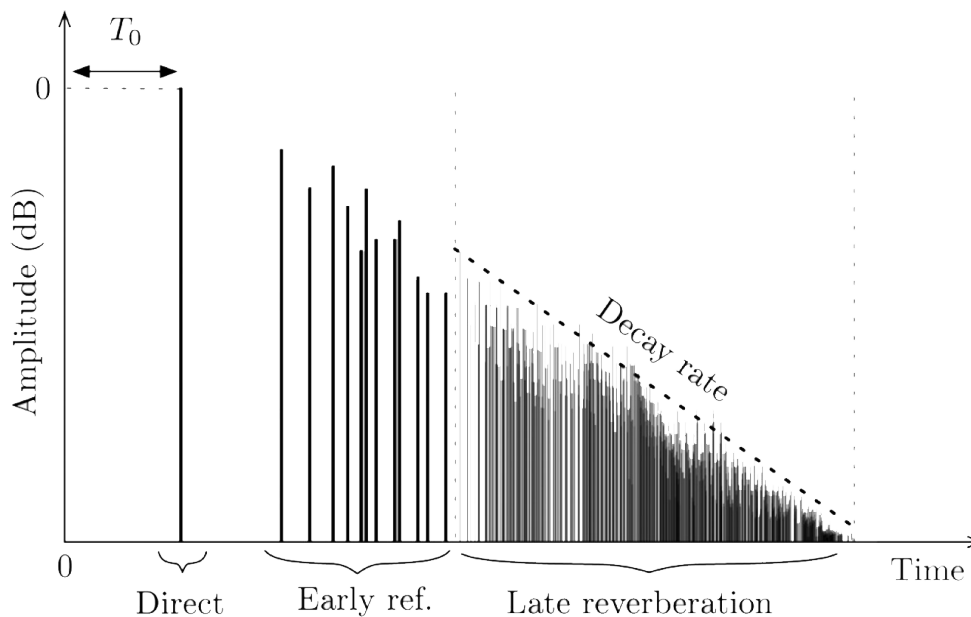
constitutivos mais intrínsecos aos objeto sonoro (timbre, dinâmica, altura). Uma primeira razão está no fato de o controle de tal característica ser excessivamente complexo ou dispendioso, pois, uma alteração direta de tal parâmetro requer modificações arquitetônicas e/ou construtivas, que são estáticas e não podem estar sujeitas às mesmas escalas de modificação temporal dos parâmetros musicais. Em segundo lugar, antes do advento da computação e processamento digital de sinais, soluções eletromecânicas para modificação de parâmetros espaciais eram dispendiosas e excessivamente complexas. Assim, até a virada entre os séculos XX e XXI o áudio espacial ficou restrito a alguns experimentos multicanal da música eletroacústica acusmática e, comercialmente, aos sistemas mono/estéreo, além do *surround* no cinema. Como consequência, a pouca manipulação espacial disponível concentrou-se mais na ideia de *direção*¹ e menos na ideia de *distância*, essa última mais multifatorial e difícil de ser controlada, especialmente por ser estritamente ligada à ideia de reverberação.

A reverberação, numa definição genérica, é o efeito sonoro de prolongação de um som, em especial, causado pelas características reflexivas do espaço no qual este se propaga. Devido às sucessivas e múltiplas interações que um som tem com os obstáculos e superfícies de um dado espaço, é como se múltiplas cópias de um som se submetessem a múltiplos fenômenos físicos (reflexão, espalhamento, refração, difração, atenuação, interferência e sobreposição), cada qual com sua singularidade, atingindo então cada ponto de captação desejado (ouvido ou microfone) com uma característica acústica ao mesmo tempo diversa e correlata. Assim, a resposta ao impulso típica de um sistema com reverberação (Figura 1) será constituído por um tempo de atraso geral T_0 , que fornece as características direcionais da fonte²; as reflexões iniciais (*early reflections*), que se comportam como um eco e fornecem as impressões de geometria e materiais do espaço; a reverberação tardia (*late reverberation*) proveniente de um aumento sucessivo da reflexões e atenuações, gerando um maior densidade de eco e soando como uma espécie de ruído gaussiano que retém características da fonte; e por fim, o tempo de reverberação T_{60} , tempo necessário para a pressão sonora decair 60 dB, que indica o tamanho do espaço e a absorção das suas superfícies (VÄLIMÄKI et al., 2012).

¹ Manipulação da diferença de intensidade ou diferença de fase de uma dada fonte entre alto-falantes para se modificar a percepção de direção desta fonte (MOORE, 2013, p. 247).

² As diferenças de tempo de chegada (*Interaural Time Difference - ITD*) e de nível (*Interaural Level Difference - ILD*) entre ouvidos são especialmente determinantes na localização de sons no plano horizontal (MOORE, 2013, p. 245-271).

Figura 1 – Resposta ao impulso genérica de um sistema de reverberação



Fonte: Välimäki *et al.* (2012)

Além de acrescentar diversas características timbrísticas a um dado objeto sonoro, a reverberação confere um senso de espacialidade a tal objeto: profundidade, difusão, clareza, presença e densidade são alguns dos adjetivos utilizados na prática de gravação e mixagem para descrever as nuances perceptivas desse fenômeno. Com base nos estudos sobre os mecanismos utilizados pela audição para detecção de sons espaciais (ZAHORIK *et al.*, 2015), tornou-se possível, na reprodução de sons via alto-falantes, simular a distância de fontes sonoras a partir da manipulação do conteúdo espectral, da intensidade e da proporção som direto / som difuso, criando uma imagem sonora fantasma que sugere ao ouvinte, com certo nível de realismo, a distância subjetiva de uma dada fonte sonora.

Dispositivos de reverberação e as consequências estéticas de sua utilização

Nos primórdios da gravação eletromecânica, conjuntos musicais inteiros eram gravados por um único microfone e a reverberação natural do ambiente em que se encontravam também era registrada. A partir da necessidade de se obter um controle maior do conteúdo gravado, múltiplos microfones passam a ser utilizados para se registrar subgrupos (naipes, seções, baterias) ou instrumentos individuais, em especial, posicionando os microfones o mais

próximo o possível do instrumento desejado. Essa técnica concentrava a captação na fonte desejada e propiciava uma maior rejeição de ruídos, porém aumentava a relação entre som direto e som difuso (reverberante), tornando as fontes sonoras captadas mais secas. Concomitantemente, surgia a possibilidade de se gravar instrumentos separadamente e somá-los depois (*overdub* e *mix*). Isso levou os estúdios de gravação a se especializarem, os quais passaram a dispor de salas especiais de gravação com tratamentos acústicos que amorteciam as reflexões e diminuía a reverberação. Assim, a técnica básica de gravação de instrumentos musicais e vozes se direcionou a reduzir os efeitos do ambiente (estúdios secos) e focar na fonte sonora almejada (microfonação próxima), o que reduzia drasticamente as características reverberantes antes presentes nas gravações. A partir daí, diversos sistemas de reverberação artificial foram sendo desenvolvidos para retomar características fundamentais trazidas pela reverberação: sensação de espacialidade, presença/distância da fonte, aglutinação de fontes distintas, sustentação de sons curtos, dentre outras.

Os primeiros sistemas de reverberação artificial se dividem em duas grandes categorias: eletromecânicos e câmaras acústicas: nos primeiros, o som passa por algum processo de transdução que adiciona ao sinal características bastante similares às de uma sala reverberante, como, por exemplo *delays* de fita magnética, molas tensionadas e chapas metálicas. No segundo tipo, salas acústicas são construídas de forma a ressaltar as propriedades reflexivas (paredes de materiais lisos, obstáculos não rugosos, etc) e um sistema de alto-falante e microfone é inserido nesta câmara de forma a capturar sua impressão digital sonora (BURGESS, 2014, p.62-63).

A partir desse controle mais preciso e artificial dos elementos constitutivos da cena auditiva, o áudio gradativamente se desloca da representação figurativa do campo sonoro percebido pelo ouvinte para uma criação abstrata registrada, transformada e composta nas etapas gravação, mixagem e masterização; desloca-se da tentativa de registro *per se* da escuta humana para uma proposta de representação criativa de um acontecimento sonoro. Em especial nesse contexto, a reverberação começa a ganhar um espaço de exploração criativa, possibilitando não somente uma sugestão de espacialidade e distância, uma vinculação auditiva com o espaço físico concreto, mas transformando os objetos sonoros por meio de modificações timbrísticas profundas, deslocando as sensações de profundidade e clareza bem como aglutinando objetos que fisicamente nunca se apresentam amalgamados.

Todavia, tais sistemas de reverberação apresentavam altos custos de aquisição e manutenção, baixa ou inexistente mobilidade (logo, reduzido uso em som ao vivo) e difícil customização (em geral somente um controle de dry/wet e em alguns casos controle do tempo de decaimento). Tal fator tanto dificultava explorações mais pormenorizadas na mixagem, como por exemplo uma utilização de diferentes qualidades timbrísticas de *reverb* para cada instrumento. Dados tais custos e dificuldades de operação, os sistemas de reverberação artificial quase sempre eram utilizados segundo a lógica de *send-return* que imprimia uma característica mais acessória à utilização da reverberação, pois geralmente vários canais tinham de ser somados e enviados ao reverberador, impedindo, assim, um trabalho mais pormenorizado e individualizado.

Assim, a reverberação artificial aparece com função de suprir a falta de ambiência (gravações feitas em estúdios secos), criar novas ambiências (especialmente em casos de sons sintéticos que não apresentam nenhuma ambiência aos serem produzidos), criar e modificar timbres; separar instrumentos (cada instrumento com uma quantidade distinta de reverb, soado em espaços distintos, logo mais facilmente separáveis auditivamente); “colar” a mixagem (fornecer a sensação que todos os instrumentos foram executados em um mesmo local, prover alguma característica comum a todos os canais individuais) e suprir falhas técnicas (auxiliar na sustentação de notas em instrumentos com pouca sustentação, borrar desafinações de grupos instrumentais). Destaca-se que esses procedimentos, geralmente, fornecem imagens espaciais pouco compatíveis com as propriedades físicas dos instrumentos e vozes utilizados. Um exemplo evidente está na prática de cantores que utilizam a técnica de sussurrar ao microfone, de João Gilberto ao *whisperpop* de Billie Eilish e Lana Del Rey, na qual os mais sutis ruídos da cavidade bucal são amplificados ao ponto de se igualarem em intensidade à instrumentos de percussão e ao mesmo tempo são processados por reverberadores causando uma sensação de distância e opacidade. A criação/sugestão de uma imagem espacial ao ouvinte se dá também por elementos constitutivos da reverberação que podem ser inseridos parcialmente na cadeia de efeitos: filtros, ecos, pan, compressores, chorus, dentro outros, costumam, inevitavelmente, sugerir auditivamente características tipicamente espaciais. A partir do final dos anos 1970, em especial, a utilização de *noise-gate* para engatilhar o canal de reverb se tornou prática comum, marcando especialmente os sons de bateria que viriam ao longo da década de 1980. Essa técnica destaca fortemente o ataque da reverberação, recorta subitamente o seu decaimento (para aproximadamente o mesmo decaimento do sinal original), inserindo ambiências de locais muito

grandes e com longos tempos de reverberação dentro de curtas durações, consequentemente, desmanchando as correspondências perceptivas com o fenômeno físico-acústico da reverberação de salas.

Reverberação em sistemas de áudio multicanal

A experiência sensorial de espaços acústicos é um fenômeno multimodal e o campo sonoro gerado nesses ambientes é extremamente complexo. A reverberação é o fenômeno dominante nessas situações, todavia sua compreensão exata é difícil dada a necessidade de avaliação de cada ponto do espaço, com suas hipotéticas medições, reproduções e simulações (VORLÄNDER, 2008, p.92-94). É consensual no campo da acústica que a experiência da reverberação artificial, mediada por alto-falantes, ainda é bastante distinta da experiência física propiciada por salas (BRINKMANN, 2009), e se conjectura que isso dá menos pela “fidelidade”³ dos instrumentos de medição e reprodução (microfones e alto-falantes) e mais pelo reducionismo tecnológico necessário para modelar, representar e simular tais fenômenos (HELLER, 2013, p. 98-100). É tipicamente difícil fornecer uma impressão realista de reverberação em sistemas mono e estéreo pois estes estão, conceitualmente, mais distantes dos mecanismos acústicos conhecidos. Os sistemas binaurais e multicanais são os mais bem sucedidos *designs* nesse sentido por se concentrarem em simular a percepção auditiva diretamente no aparato biológico humano ou diretamente na produção de campo sonoro espacial de forma homogênea.

A partir de meados dos anos 2000, com o amplo barateamento dos custos computacionais e aumento do *throughput* e da performance em tempo real, sistemas multicanal de alta ordem puderam ser realizados com hardwares domésticos ou semi-profissionais que se popularizaram. Além disso, diversos softwares iniciam o suporte a áudio multicanal (SuperCollider, PureData, Reaper, Max), e assim algoritmos de alto custo computacional passavam a poder a ser executados em tempo real com confiabilidade, robustez e esforço aceitável em um grande número de canais de áudio. Diante desse cenário, técnicas de *panning* e de síntese de campos sonoros como *Vector Based Amplitude Panning* (VBAP), *Multiple Direction Amplitude Panning* (MDAP), *Wave Field Synthesis* (WFS) e *Ambisonics* (SPORS *et al.*, 2013; ZOTTER e FRANK, 2019) surgiram com alternativas à ideia de áudio baseado em

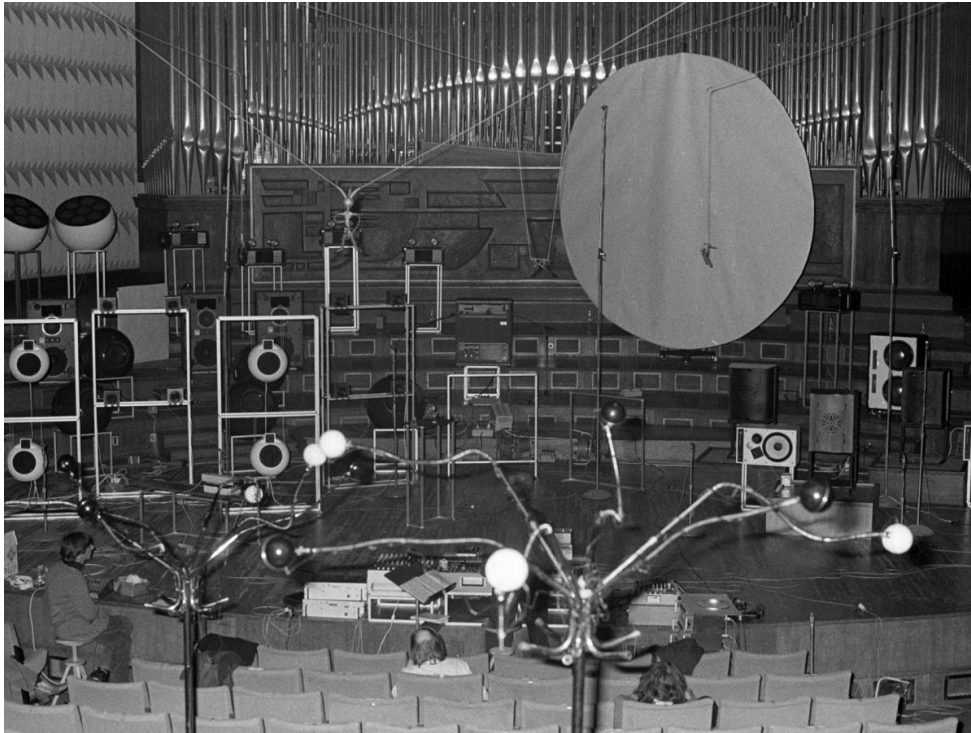
³ Avaliada de maneira simples como resposta em frequência relativamente plana, atraso de grupo mínimo, distorção harmônica baixa, padrões polares de captação/emissão regulares, etc.

canais (*channel-based*). Nestas se trabalhava com cada canal individualmente e a cada mudança na quantidade de canais (*e.g.* apresentação em um novo espaço com outra configuração de alto-falantes) era necessária uma nova renderização e/ou uma re-estruturação e desenvolvimento da peça para acomodar as alterações. As novas perspectivas baseadas na criação de um campo sonoro (ativação de múltiplos alto-falantes para produzir um campo sonoro dentro de uma área específica) introduziram um sistema de *encoder/decoder* que tornava a execução mais agnóstica em relação ao layout dos sistemas de reprodução. Concomitantemente, também surgiram sistemas de áudio espacial para solucionar problemas mais específicos: áudio binaural⁴, trabalhando de forma mais direta com as pistas auditivas utilizadas para compreensão do senso de espacialidade e fornecendo uma perspectiva imersiva altamente convincente e realista; conformação de feixes (*beamforming*), no qual se utiliza um conjunto de microfones ou de alto-falantes para detectar/produzir um som em uma dada direção; e auralização, processo de modelar, simular e renderizar cenas acústicas de um dado espaço virtual qualquer.

Dentro dessas perspectivas a reverberação ocupa um ponto crucial, pois a princípio a condição ideal e básica de cálculos, o campo livre (*free field*), só é encontrada parcialmente em ambientes estritamente controlados como câmaras anecóicas. Todo tipo de espaço, ou mesmo o corpo dos instrumentos musicais, apresenta alguma característica reflexiva, logo, algum tipo de reverberação (HELLER, 2013, p. 250-254). Sob essa perspectiva, certas abordagens da engenharia e acústica utilizam a reverberação como ferramenta de simulação e aprimoramento da espacialidade de ambientes físicos ou virtuais. A saber: alteração dos parâmetros acústicos de uma sala (*virtual acoustics*) e simulação de múltiplos ambientes por meio de sistemas de microfones e alto-falantes ou de paredes ativas (compostas por sistemas de alto-falantes); renderização de geometrias complexas em cenários de realidade virtual (jogos em que o personagem se encontram na bifurcação de espaços com diferentes características); *upmixing* para sistemas multicanal de alta ordem; síntese de instrumentos musicais, em especial corpo de instrumentos de cordas e efeito do pedal de *sustain* do piano, dentre outros (VÄLIMÄKI *et al.*, 2012). Além disso, assume-se que algum tipo de reverberação é necessária para uma reprodução satisfatória de fontes virtuais, pois ambientes excessivamente secos poderiam acentuar os efeitos de filtro pente. Conjuntamente, ambientes excessivamente reverberantes devem ser evitados por prejudicar a localização de tais fontes (ITU, 1997, p.10-11; FRANK, 2014).

⁴ Embora seja conceitualmente excessivo classificar os sistemas binaurais como multicanal, vale ressaltar que as diversas tecnologias utilizadas para medição, teste e validação desses sistemas tendem a operar com arranjos de microfones e/ou alto-falantes multicanal.

Figura 2 – Diversos tipos de alto-falantes e caixas acústicas utilizados no *acousmonium*.



Fonte: INA-GRM, 1980. Foto por Laszlo Rusk - <https://designingsound.org/2014/05/30/art-of-surround/>

Na música eletroacústica, desde os anos 1950, duas vertentes foram se consolidando com explorações da espacialidade sonora: uma investigando configurações estritamente específicas a cada peça e outra mais focada na música acusmática executada em “orquestras” de alto-falantes, o chamado *acousmonium*, desenvolvido a partir dos trabalhos de Pierre Henry e François Bayle no Groupe de Recherches Musicales (GRM) (VAN ECK, 2017; ZVONAR, 2005). Na primeira, que preferimos denominar como *space-specific*, por serem peças geralmente *site-specific* porém concentradas em características espaciais destes locais, ressaltamos peças como *I am sitting in a room* (1969) de Alvin Lucier e *Pendulum music* (1968) de Steve Reich, que apresentam a reverberação e a diretividade como elementos constitutivos essenciais da performance. Nesses casos, o acoplamento constituído pelos alto-falantes e o espaço possibilita explorações de minúcias difíceis de serem manipuladas em sistemas generalistas, por exemplo, a diretividade das fontes, as ressonâncias de pontos específicos da sala, as características reflexivas/absorventes das superfícies, a interferência da intensidade nas respostas espaciais, bem como os diversos acoplamentos entre esses fatores.

Já a tradição iniciada pelo *acousmonium* (Figura 2) se concentrou na técnica de *difusão*: o controle em tempo real⁵ dos parâmetros e efeitos intra/inter relacionados a cada canal, como pan, filtragem, reverberação, compressão, etc (ZVONAR, 2005; TERUGGI, 2007; HARRISON, 1998). Como solução intermediária ao Ambisonics e ao *space-specific*, as salas de concertos projetadas para a difusão sonora geralmente apresentam um ou mais arranjos circulares/hemisféricos de alto-falantes para utilização de técnicas de pan; conjuntos de alto-falantes projetados contra superfícies de forma a produzir sons mais reverberantes e difusos; e arranjos menos ortodoxos de alto-falantes, como conjuntos de *tweeters* fixados no teto (WILSON e HARRISON, 2010). Apesar dos layouts singulares, as técnicas de difusão parecem apresentar algum denominador comum:

Na *difusão* de (Pierre) Henry (e de fato isso é verdade para a maioria dos seus colegas de difusão), o maior interesse não é em mover os sons em volta do espaço mas, ao invés, na articulação da música por meio da execução de diferentes trechos ao longo de diferentes conjuntos de alto-falantes. Assim, um som que é massivo e assustador pode ser enviado a um par de grandes caixas acústicas posicionadas longe no fundo do palco e então, gradualmente, ser introduzido em um grande número de alto-falantes circundantes ao público, enquanto, simultaneamente aumenta-se a alimentação do subwoofer. Semelhantemente, um som delicado pode ser circulado ao longo de uma bateria de pequeníssimos *tweeters* suspensos sob o público. (ZVONAR, 2005)

Um ponto chave do áudio multicanal é a decorrelação dos vários sinais presentes. A execução simultânea de um sinal monofônico em um conjunto de alto-falantes espalhados no espaço gera um sistema de diferentes filtros pente a cada ponto desse espaço, isso implica que cada pequeno movimento de cabeça do ouvinte gerará um som de filtro móvel entre seus ouvidos. Tal sensação é ora classificada como extremamente desagradável, especialmente quando se pretende gerar um campo sonoro que cubra uma área inteira da forma mais abrangente possível, ora como especial e agradável, pois é possível utilizar essa espécie de filtragem espacial e subjetiva como efeito sonoro. Perspectivas como o Ambisonics (Figura 3) e o MDAP conseguiram minimizar tal efeito, porém sob a necessidade da utilização de um layout de caixas o mais homogêneo o possível e de um espaço com tempo de reverberação nem tão curto — *e.g.* salas com materiais acústicos extremamente absorventes — tampouco extremamente longo — *e.g.* igrejas, salas cúpulas, vãos, etc (FRANK, 2014). Nas práticas de

⁵ Tradicionalmente via console de mixagem e recentemente via processamento computacional.

difusão, diversas estratégias criativas são utilizadas, como separação do espectro da fonte em vários pontos do espaço, aplicação de reverberação multicanal (e/ou outro tipo de efeito com alterações timbrísticas mais intensas), decorrelação via randomização das fases do espectro, dentre outras (KENDALL, 1995; WILSON e HARRISON, 2010). Frequentemente, tais estratégias funcionam para um ponto ótimo do estúdio/sala de concertos eletroacústicos (*sweet spot*) e não abrangem uma área de cobertura (*sweet area*) como nos sistemas Ambisonics, WFS e MDAP, além de produzir diversos artefatos sonoros que podem ser do interesse do compositor ou não.

Figura 3 – Arranjo hemisférico de alto-falantes utilizando sistema Ambisonics



Fonte: Herberger Institute for Design and the Arts - <https://prismsfestival.com/ambisonic-dome>

Tanto na difusão da música acusmática quanto nas práticas de gravação tradicionais um ponto comum é a captação de uma fonte por meio de diversos microfones espacialmente distribuídos de forma a gerar decorrelação dos sinais. Nas gravações orquestrais, dá-se como fato que a utilização de vários microfones ou agrupamentos de microfones distribuídos ao longo da área ocupada pela orquestra ajuda na percepção da espacialidade quando estes são mixados para estéreo (PFANZAGL-CARDONE, 2019). Na situação da música acusmática, diversos layouts e situações vêm sendo propostos, porém uma prática que se destacou foi a apresentação de múltiplas gravações estéreo ao longo dos diversos pares de alto-falantes dos *acousmoniums*

(ZVONAR; 2005; HARRISON, 1998). Destaca-se novamente que a reverberação é um item essencial para produção de decorrelação tanto na etapa de gravação multicanal quanto na sua reprodução e ainda que, dado o nível de complexidade gerado pelo entrelaçamento dessas amostras, seus comportamentos e resultados ainda são pouco elucidados.

Pouco se menciona na literatura que a experiência auditiva da espacialidade sonora requer um certo nível de treinamento e concentração. As pistas de localização e a proporção som direto/som difuso tendem a ser facilmente percebidas pelo público não especializado em escuta espacial, porém as diversas nuances destes fenômeno costumam passar despercebidas: complexos padrões de diretividade dos instrumentos, *presença/proximidade* das fontes, ressonâncias no/do espaço, dentre outras. Nos sistemas similares ao *Acousmonium*, a percepção das propostas espaciais sugeridas pelos compositores tende a ser mais difícil e heterogênea do que nos sistemas como Ambisonics, uma vez que cada peça e cada layout constituem uma experiência única, não necessariamente projetada a partir dos estudos da escuta humana.

Reverberação como simulação de distância

Nos sistemas Ambisonics, a reverberação aparece como um duplo papel: fornecer/alterar a sensação de ambiência das salas/estúdios de reprodução⁶ e também simular e sugerir a distância das fontes⁷. Geralmente, insere-se o sinal de áudio em um *encoder* específico para gerar as reflexões iniciais (simulador do tipo *shoebox* via método fonte-imagem) e utiliza-se um reverberador do tipo *feedback delay network* (FDN) para gerar a reverberação tardia. Destacam-se algumas das ferramentas como o SPAT, as suítes de plugins do IEM e SPARTA (IEM, 2023; SPARTA, 2023; CARPENTIER, NOISTERNIG, WARUSFEL, 2015). No caso do SPAT, parâmetros perceptivos, presentes no jargão das ferramentas comerciais de reverberação e ainda não totalmente esclarecidos cientificamente, são oferecidos ao usuário: presença da fonte, presença do espaço, calor (*warmth*), brilho, *running reverbance* e envelopamento. Além disso, estes sistemas costumam apresentar simulação de efeito doppler para tornar o movimento das fontes ainda mais realista dentro do campo sonoro.

⁶ Uma vez que tais espaços tendem a apresentar tempos de reverberação nos limites inferiores dos valores sugeridos pela ITU-R BS.1116-1.

⁷ Distância a partir do ponto onde se encontram os alto-falantes até um ponto teórico externo localizado no infinito. Nos arranjos esféricos/circulares com Ambisonics, não é possível simular fontes no interior do arranjo como no caso do Wave Field Synthesis (fonte focal).

Destaca-se que essas ferramentas, ao permitirem uma síntese de campo sonoro em três dimensões que fornece uma simulação realista, implicam em uma carga de trabalho consideravelmente grande, pois o compositor/artista sonoro além de se ocupar de tarefas como elaboração/organização dos materiais, conceituação da peça, desenvolvimentos computacionais, dentre outros, ainda terá de elaborar e desenvolver o desenho sonoro-espacial de cada objeto sonoro individualmente. Observamos que atualmente, uma tendência é abordar esse processo de forma algorítmica e, de outra maneira, dividir as etapas da criação em grupos de trabalho, especialmente quando as peças envolvem também alguma forma de visualidade (animações, filmes, performances, etc).

Esse nível de realismo também implica numa menor possibilidade de utilização de ferramentas criativas, uma vez que alterações na resposta do conjunto codificador de sala (primeiras reflexões) em paralelo com FDN (reverberações tardias), para, por exemplo, se obter uma sonoridade de reverb de mola ou reverb de chapa (*plate*) podem implicar numa perda de realismo, especialmente da sensação tridimensional de distância. No contexto de áudio 3D, ainda não parece haver uma resposta clara sobre como proceder com os materiais tradicionais da música gravada. Na situação da bateria, por exemplo, qual solução adotar para a largura da fonte? Utilizar uma largura que cubra todos os falantes frontais ou somente aqueles que cubram uma área física abrangida pelo instrumento? Como aplicar a reverberação e compressão: aplicar um tipo de reverberação para cada peça ou tentar realizar a reverberação da forma mais realista o possível? Algum tipo de instrumento deve executar movimentos em todo o hemisfério? Se sim, utilizar somente instrumentos eletrônicos (sintetizadores e efeitos) ou utilizar movimentos em instrumentos acústicos?

Notamos ainda um problema fundamental em tais simulações, a presença de dois ambientes reverberantes simultâneos: a sala física em si e o espaço sugerido pelo campo sonoro oriundo dos alto-falantes. A cada acontecimento *in loco* na sala física — barulhos da platéia, instrumentos musicais, vibrações de elementos devido ao campo sonoro intenso — imediatamente o ouvinte se distrai, perde brevemente a sensação de imersão sugerida pelos alto-falantes, e detecta a espacialidade do conjunto fonte-reverberação presente na sala. Isso reduz a possibilidade de se trabalhar com campos sonoros de pouca intensidade, dificultando também a sensação de proximidade. Como alternativa, pode-se manter o nível sonoro das caixas acústicas em um valor alto, diminuindo a discrepância dos ruídos presentes na sala, porém

diminuindo as possibilidades de trabalho do sistema (e também sob o risco de se causar danos auditivos ao público).

Apontamentos futuros

Ao longo do presente texto revisamos algumas tendências da utilização criativa da reverberação, porém não pormenorizamos técnicas típicas da *computer music* que ainda não foram de todo incorporadas na produção musical mono/estéreo ou multicanal. Nesse campo, a reverberação, se entendida, de maneira mais ampla, como um processo de prolongação/continuação de um objeto sonoro pode ser obtida por meio de diversas técnicas (tradicionais ou heterodoxas) de processamento de sinais. Para tanto, um novo trabalho concentrado especificamente nessa ideia será desenvolvido.

As técnicas de áudio multicanal baseadas em pistas auditivas (em especial Ambisonics e binaural) realizam, essencialmente, operações de filtragem, *pan* e *delay* entre seus canais. Fontes sonoras ou efeitos que promovam intervenções profundas nestas variáveis tendem a anular os efeitos de espacialidade gerados pela simulação. Uma fonte de ruído rosa se movendo ao longo de um hemisfério Ambisonics ou numa gravação binaural é de fácil detecção pelo ouvinte. Todavia, um maior número de fontes de ruído rosa se movendo independentemente nessas configurações se tornam difíceis de serem rastreadas auditivamente. Ainda não foi esclarecido, porém, se este problema está mais diretamente ligado ao sistema eletroacústico utilizado ou aos mecanismos da escuta humana de separação de fontes.

Atualmente, os sistemas de reverberação multicanal se concentram na resolução do problema da irradiação sonora (onda viajantes que partem de distâncias infinitas e incidem em uma certa área central) e pouco foi desenvolvido na perspectiva da radiação sonora (ondas viajantes que partem de uma certa área central e emergem em direção ao infinito). Recentemente, o desenvolvimento de dispositivos como o IKO, conforme Zotter *et. al.* (2017), solucionou diversos problemas relativos à simulação de emissão sonora de uma fonte esférica genérica. Assim, é possível, atualmente, iniciar pesquisas mais detalhadas sobre a influência da diretividade da fonte sonora na reverberação de salas.

Referências

BRINKMANN, Fabian et al. *A round robin on room acoustical simulation and auralization*. The Journal of the Acoustical Society of America, v. 145, n. 4, p. 2746-2760, 2019.

- BURGESS, Richard James. *The history of music production*. Oxford University Press, 2014.
- CARPENTIER, Thibaut; NOISTERNIG, Markus; WARUSFEL, Olivier. *Twenty years of Ircam Spat: looking back, looking forward*. In: 41st International Computer Music Conference (ICMC). 2015. p. 270-277.
- FRANK, Matthias. *How to make Ambisonics sound good*. In: Forum Acusticum. Krakow. 2014.
- HARRISON, Jonty. *Sound, space, sculpture: some thoughts on the 'what', 'how' and 'why' of sound diffusion*. Organised Sound, v. 3, n. 2, p. 117-127, 1998.
- IEM - INSTITUT FÜR ELEKTRONISCHE MUSIK UND AKUSTIK. IEM Plug-in Suite. Graz. 2023. Disponível em: <https://plugins.iem.at/> . Acesso em: 04/08/2023.
- ITU - INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. ITU-R BS.1116-1: *Methods for the Subjective Assessment of Small Impairments in Audio Systems Including Multichannel Sound Systems*. International Telecommunication Union, 1997.
- KENDALL, Gary S. *The decorrelation of audio signals and its impact on spatial imagery*. Computer Music Journal, v. 19, n. 4, p. 71-87, 1995.
- MOORE, Brian C. *An introduction to the psychology of hearing*. 6 edição. Leiden, Holanda. Brill, 2013. 420 p.
- OWSINSKI, Bobby. *The mixing engineer's handbook*. Boston: Thomson Course Technology, 2006.
- PFANZAGL-CARDONE, Edwin. *The Art and Science of Surround-and Stereo-Recording*. Springer Wien, 2019.
- SPARTA - Spatial Audio Real-Time Applications. A collection of open-source VST audio plug-ins for producing and reproducing spatial sound scenes. Aalto. 2023. Disponível em: <https://leomccormack.github.io/sparta-site/> . Acesso em: 04/08/2023.
- SPORS, Sascha.; WIERSTORF, Hagen; RAAKE, Alexander; MELCHIOR, Frank; FRANK, Mattias; ZOTTER, Franz; *Spatial sound with loudspeakers and its perception: A review of the current state*. Proceedings of the IEEE, v. 101, n. 9, p. 1920-1938, 2013.
- STAUTNER, John; PUCKETTE, Miller. *Designing multi-channel reverberators*. Computer Music Journal, v. 6, n. 1, p. 52-65, 1982.
- TERUGGI, Daniel. *Technology and musique concrète: the technical developments of the Groupe de Recherches Musicales and their implication in musical composition*. Organised Sound, v. 12, n. 3, p. 213-231, 2007.
- VÄLIMÄKI, Vesa; PARKER, Julian D.; SAVIOJA, Lauri ; SMITH, Julius O.; ABEL, Jonathan S. *Fifty years of artificial reverberation*. IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, v. 20, n. 5, p. 1421-1448, 2012.
- VAN ECK, Cathy. *Between air and electricity: microphones and loudspeakers as musical instruments*. Bloomsbury Academic, 2017.
- VORLÄNDER, Michael. *Auralization*. Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- WILSON, Scott; HARRISON, Jonty. *Rethinking the BEAST: Recent developments in multichannel composition at Birmingham ElectroAcoustic Sound Theatre*. Organised Sound, v. 15, n. 3, p. 239-250, 2010.

ZAHORIK, Pavel; BRUNGART, Douglas S.; BRONKHORST, Adelbert W. *Auditory distance perception in humans: A summary of past and present research*. ACTA Acustica united with Acustica, v. 91, n. 3, p. 409-420, 2005.

ZOTTER, Franz et al. *A beamformer to play with wall reflections: The icosahedral loudspeaker*. Computer Music Journal, v. 41, n. 3, p. 50-68, 2017.

ZOTTER, Franz; FRANK, Matthias. *Ambisonics: A practical 3D audio theory for recording, studio production, sound reinforcement, and virtual reality*. Springer Nature, 2019.

ZVONAR, R. *A history of spatial music: Historical antecedents from renaissance antiphony to strings in the wings*. eContact!: The online journal of the Canadian Electroacoustic Community (CEC), 7 (4). 2005.