

INFLUÊNCIA DA ACÚSTICA DO PALCO NA PERFORMANCE MUSICAL: SISTEMA ELECTROACÚSTICO PARA AURALIZAÇÃO INTERACTIVA COM MÚSICOS

G. Almeida^{1,2}, O. Inácio¹

¹ UNIMAE — Unidade de Investigação da ESMAE-IPP — Laboratório de Acústica Musical, Porto
gustavoalmeida@esmae-ipp.pt; octavioinacio@esmae-ipp.pt

² Centro de Investigação em Ciência e Tecnologia das Artes (CITAR), Universidade Católica Portuguesa —
Escola das Artes (UCP-EA), Porto – Portugal

Resumo

Pouco mais de 3 décadas passaram após se terem publicado os primeiros estudos sobre as condições acústicas preferenciais para os músicos em concerto [1-3]. Contudo, as dificuldades em obter fortes evidências sobre a influência da acústica do palco na performance musical bem como as condições acústicas preferenciais para os músicos mantêm-se até aos dias de hoje. Neste artigo analisamos as metodologias que têm vindo a ser empregues nesta área de investigação com particular enfoque para a experimentação em laboratório. Um novo modelo para auralização em tempo real é proposto tendo em conta o cancelamento do feedback e a direccionalidade da radiação sonora dos instrumentos acústicos. Os procedimentos de calibração e o desempenho do sistema electroacústico são apresentados. Os resultados preliminares sugerem que o modelo proposto pode ser implementado em laboratório para avaliar as condições acústicas preferenciais para os músicos e a forma como estas influenciam a performance musical.

Palavras-chave: Acústica do Palco, Auralização Interactiva, Cancelamento de Eco.

Abstract

More than 3 decades have passed since the first publications about the preferred acoustical conditions for musicians during a concert [1-3]. However, the difficulties in obtaining strong evidences about the influence of the stage acoustics on the musical performance, as well as the preferred acoustical conditions for musicians are still present today. In this paper we analyze the methodologies that have been proposed in this area of research with particular emphasis on laboratory experimentation. A new model for real-time auralization is proposed taking into account feedback cancelation and the radiation directivity of acoustical instruments. The performance and calibration of the electroacoustic system is presented. Preliminary results suggest that the proposed model can be implemented in laboratory to evaluate the preferred acoustical conditions for musicians and the way these influence the musical performance.

Keywords: Stage Acoustics, Interactive Auralization, Echo Cancellation.

PACS no. 43.55.Lb, 43.55.Hy

1 Introdução

Os espaços para performance musical têm sofrido significativas alterações – acústicas e arquitectónicas – desde o período da Renascença. O tipo de repertório musical aí executado, em particular o que faz uso de instrumentos acústicos, tem influenciado essa mudança ao longo dos diferentes períodos da história da música [4]. Da mesma forma que um maestro ajusta a integração de uma orquestra ao espaço acústico [4, 5] – por forma a obter um resultado sonoro que corresponda ao objectivo do compositor – o músico profissional, individualmente, também adapta a sua performance às diferentes condições, pelo menos de forma inconsciente [6]. A sala de concerto pode ser vista como uma extensão do instrumento musical através da qual os músicos percebem a qualidade sonora dos seus e dos demais instrumentos. Assim, os músicos alteram a intensidade, tempo, fraseado, timbre e entoação de acordo com o que ouvem [7].

Em 1978, Marshall et al. [1] publicaram um artigo sobre as condições acústicas preferenciais dos músicos ao tocarem em conjunto. Desde aí, um novo paradigma na área de investigação em acústica se iniciou — a acústica do palco. Na realidade, o palco e a zona da audiência de uma sala de concerto encontram-se no mesmo volume, pelo que as condições acústicas do palco são obviamente influenciadas pela restante sala. No entanto, a sutileza da performance musical leva a que seja significativamente afectada pelas superfícies mais próximas dos músicos, originando um grande interesse na procura por diversos investigadores da melhor configuração do palco. Já no séc. XXI, e impulsionada pelos avanços tecnológicos, Ueno [8] desenvolveu um sistema em câmara anecóica que permite simular o campo sonoro num palco, em 3 dimensões, tornando possível relacionar os parâmetros acústicos com os parâmetros musicais.

A resposta impulsiva de um espaço acústico – que nos permite obter diversos parâmetros acústicos objectivos – contém toda a informação acerca das várias propriedades que influenciam a percepção sonora dos músicos. Consequentemente, investigando a relação entre os parâmetros acústicos objectivos e as preferências dos músicos, poder-se-á otimizar os aspectos arquitectónicos dos espaços de performance para condições acústicas ideais. Pouco mais de 3 décadas passaram após os primeiros estudos [1, 2, 9] e apesar dos avanços nesta área de investigação, as dificuldades em obter fortes evidências sobre a influência da acústica do palco na performance musical bem como as condições acústicas preferenciais dos músicos, permanecem. Em parte, este problema deve-se à dificuldade em obter informação sensível por parte dos músicos – que constituem um objecto de estudo bastante heterogéneo, quer por factores relacionados com o tipo de instrumento quer mesmo pela diferente cultura musical onde o factor subjectividade é elevado. Por outro lado, os modelos electroacústicos para avaliação da performance em laboratório necessitam de evoluir com vista a uma simulação da realidade acústica mais fidedigna.

Neste artigo analisamos a implementação de uma nova abordagem para a auralização em tempo real da performance musical minimizando os problemas do feedback acústico e incorporando a natureza da radiação dos instrumentos musicais acústicos.

2 Metodologias em acústica do palco

A grande parte dos estudos realizados sobre como as condições acústicas influenciam os músicos, observam duas questões distintas: a audição mútua entre os instrumentistas, onde a necessidade de “comunicarem” e de tocar em conjunto é de extrema importância, e a influência do som reflectido no desempenho musical. Neste sentido, existem três objectos que podem ser investigados: a) as condições acústicas preferenciais para os músicos, consistindo numa avaliação subjectiva por parte de cada indivíduo; b) as propriedades acústicas e sua correlação com os parâmetros subjectivos; c) o desempenho musical e sua correlação com os parâmetros subjectivos e as propriedades acústicas.

Através de inquéritos e/ou entrevistas os músicos podem manifestar as suas preferências relativamente a determinado espaço acústico ou até mesmo sobre o seu desempenho musical — dimensão subjectiva, e.g. [1, 2, 10-17].

O espaço acústico, seja ele real ou simulado, pode ser caracterizado objectivamente através da sua resposta impulsiva. Alguns estudos, puramente objectivos, têm vindo a ser realizados, no sentido de aprofundar o conhecimento acerca do comportamento acústico no palco em salas de concerto existentes, e.g. [18]. Chiang [19] realizou simulações em computador para verificar a variação do parâmetro STearly/late com a alteração da geometria do palco. Igualmente, o trabalho de Dammerud [20] inclui estudos puramente objectivos através de modelos computacionais e à escala. Contudo, a grande maioria dos estudos, tentam encontrar correlações significativas entre as medições acústicas em salas reais e as preferências dos músicos que nelas tocaram. Gade [7, 21] e Dammerud [22] correlacionaram os parâmetros acústicos objectivos associados ao palco com as preferências subjectivas dos músicos.

Por último, poderemos efectuar também o registo áudio do desempenho musical dos sujeitos para posterior análise. Desta forma, torna-se possível correlacionar o domínio musical com o acústico através das dimensões objectivas e subjectivas. São exemplo, os trabalhos levados a curso por Bolzinger [10] numa sala real com acústica variável e mais tarde pela investigadora Japonesa Kanako Ueno em laboratório [6].

As duas abordagens de investigação principais têm sido estudos com orquestras sinfónicas a tocar em espaços reais e músicos a tocar em laboratório (campo sonoro simulado em câmara anecóica com altifalantes). A investigação que é realizada em salas reais, para além da complexidade logística intrínseca, não nos permite ter um controlo absoluto sobre os vários parâmetros do campo sonoro. No entanto, o músico está imerso num espaço real para a performance e a sua percepção acústica tridimensional não é afectada por um outro meio de transformação (electrónico). Na simulação em laboratório, por outro lado, dificilmente conseguimos recriar com total naturalidade um campo sonoro real.

3 Experimentação laboratorial com músicos

A simulação em laboratório permite-nos alterar com bastante precisão as componentes do campo sonoro e proporcionar ao músico uma experiência acústica em tempo real que pode ser realizada com *headphones* ou com altifalantes. No caso da simulação binaural [23], existem sempre dois problemas incontornáveis: por um lado a necessidade de uma HRTF (*Head Related Transfer Function*) diferente para cada músico e por outro dificuldade na percepção do som directo do próprio instrumento e dos restantes, devido ao efeito de máscara dos *headphones*. Um sistema de captação/reprodução constituído por um microfone e várias colunas elimina à partida as dificuldades de um sistema binaural.

Desde 2001 que Ueno et al. [8] estudam a influência da acústica na performance musical utilizando um sistema electroacústico em câmara anecóica para a simulação do campo sonoro em 3 dimensões. As respostas impulsivas, previamente adquiridas em salas de concerto, são processadas em tempo real com o sinal proveniente da captação do som directo dos instrumentos. Cada resposta impulsiva caracteriza o campo sonoro numa determinada direcção e é reconstituído de igual forma através de 6 altifalantes. A utilidade deste tipo de sistema tem sido reconhecida pela comunidade científica [24]. No entanto o desafio de criar um *setup* que possa proporcionar primeiras reflexões e reverberação de forma realística mantém-se.

4 Riscos inerentes à simulação electroacústica

Um dos problemas associado à simulação electroacústica com microfone e altifalante é a condição de realimentação. Observando a Figura 1, verificamos que o som produzido pelo instrumento acústico irá ser captado pelo microfone, sendo processado de seguida com as propriedades acústicas que se pretendem simular. Após o processamento de sinal, o músico irá ouvir a simulação acústica, mas será inevitável que o microfone não capte – mesmo com baixa amplitude – esse sinal. A inevitabilidade do som sintetizado ser captado pelo microfone – provocando no limite o risco de feedback – faz com que exista uma distorção das condições que se pretendem avaliar, principalmente no domínio da distribuição tempo e intensidade. Este fenómeno que é inerente a qualquer sistema de captação/reprodução e que faz parte no nosso quotidiano é denominado na literatura por eco acústico [25]. Nos últimos anos, temos assistido a um crescente interesse pela tecnologia de cancelamento do eco acústico. Por um lado, deve-se ao aumento da capacidade de processamento que permite no domínio digital utilizar com bastante eficácia filtros adaptativos. Por outro, o paradigma da comunicação na sociedade alterou-se, o que tem levado a uma crescente implementação da tecnologia do cancelamento de eco, como é o exemplo da comunicação feita por Skype.

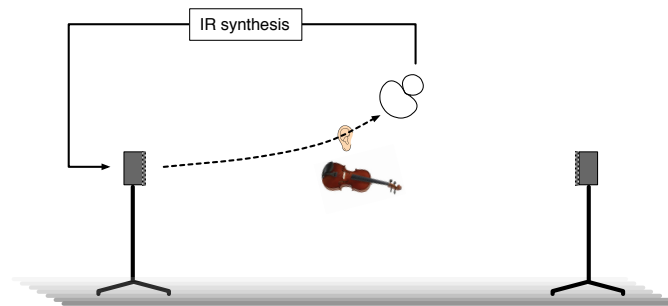


Figura 1 – Realimentação electroacústica.

Existe um segundo aspecto muito relevante, que se prende com a natureza da radiação sonora dos instrumentos musicais acústicos. Meyer [5] realizou estudos aprofundados sobre a radiação dos instrumentos de orquestra e os resultados permitem-nos entender melhor o comportamento destes às diferentes frequências. Como exemplo, ao analisarmos o diagrama polar de radiação presente na Figura 2, poderemos constatar que não existe um ponto no espaço que obedeça à condição de equilíbrio frequencial. Mais ainda, qualquer ponto que venha a ser eleito como local de captação não contempla o comportamento tridimensional de radiação e por conseguinte, a simulação tenderá a perder realismo.

Nos testes laboratoriais realizados por Ueno et al. [8], os autores optaram por utilizar em exclusivo um microfone direccional bastante próximo da fonte sonora. A utilização deste tipo de abordagem permite minimizar a captação do som sintetizado proveniente do altifalante. No entanto, e uma vez que estamos na presença de um gradiente de pressão, o efeito de proximidade exibido por este tipo de microfones associado à pouca uniformidade da sua resposta em frequência faz com que o timbre e a dinâmica do instrumento musical seja distorcido da realidade.

Não menos importante, é também o facto de que, em laboratório, o músico é confrontado com uma situação de grande proximidade a um microfone, e pode de alguma maneira condicionar a sua liberdade de movimento e expressividade.

Para além dos factores enunciados, existem outros de ordem física, fisiológica, psicológica, entre outras, que podem afectar a performance de um músico em laboratório pelo simples facto de não estarmos num espaço real de concerto.

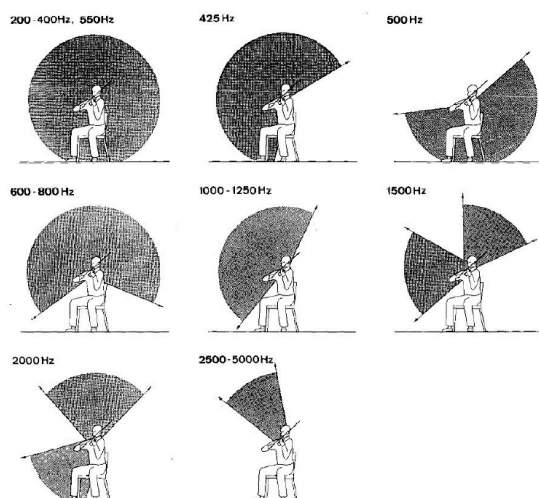


Figura 2 – Principais áreas de radiação de um violino no plano vertical, Meyer [5].

5 Um novo modelo, uma nova abordagem

Por forma a minimizar os riscos enunciados, os autores desenvolveram um modelo electroacústico que seja sensível às características de radiação dos instrumentos musicais acústicos, mais imune à realimentação e que ofereça um maior grau de liberdade aos movimentos do músico. Ao invés de se captar o som directo do instrumento com apenas um microfone, propõe-se que a captação seja efectuada em multiponto e mais distante da fonte sonora acústica. Isto permitir-nos-á minimizar o constrangimento da proximidade do microfone e captar com maior realismo a produção sonora para as diferentes direcções de radiação.

Cada subsistema (Figura 3 e Figura 4), constituído por 1 microfone e 1 altifalante, simulará uma superfície refletora. Este inclui, para além da correção da resposta em frequência, um circuito de cancelamento do eco. O sistema total compreenderá 5 subsistemas: frontal, traseiro, esquerdo, direito e superior.

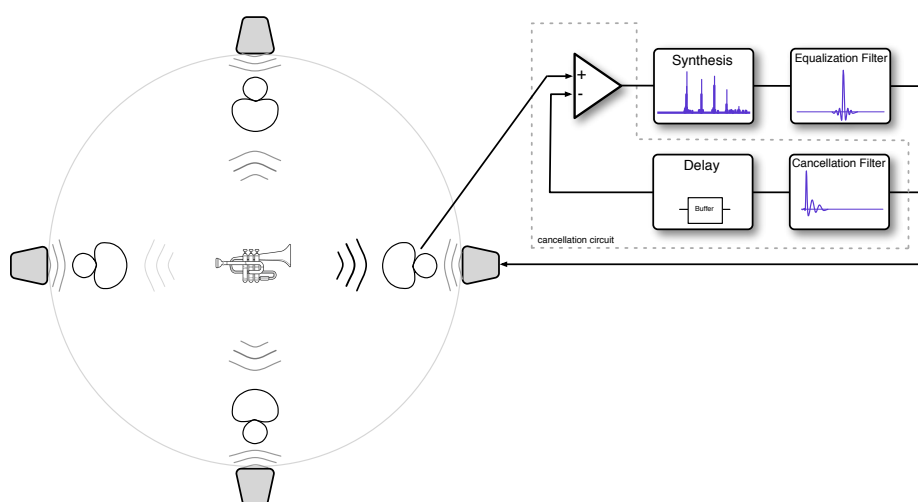


Figura 3 – Sistema electroacústico (plano horizontal) para auralização interactiva

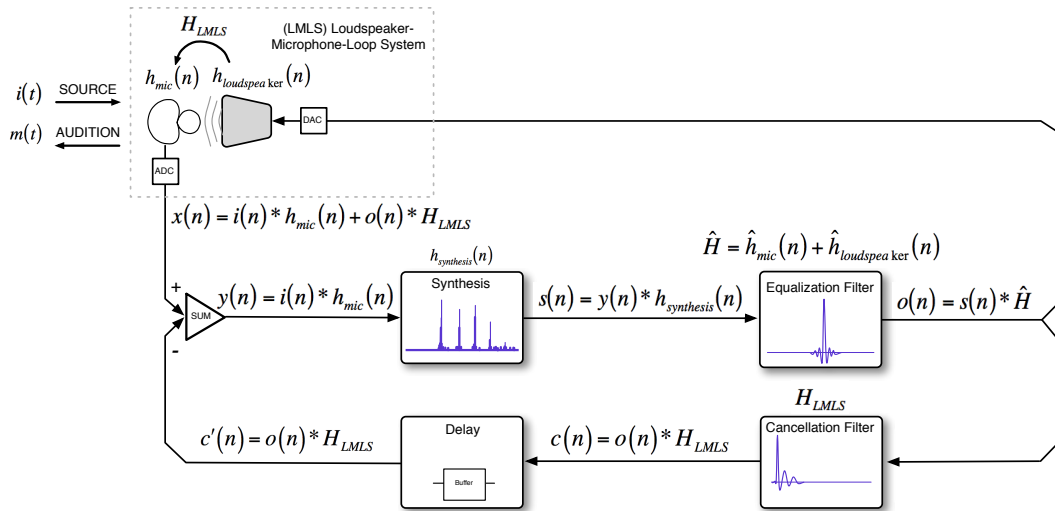


Figura 4 – Diagrama de blocos do processamento de sinal de um subsistema

6 Calibração e avaliação do modelo electroacústico

No sistema foram usados microfones AKG ck93 de condensador diafragma estreito com padrão polar de captação hipercardióide — que por apresentar o maior índice de directividade [26] nos proporciona uma atenuação de 12 dB a 180° — e altifalantes Genelec 8130A. O processamento de sinal em tempo real foi programado na aplicação MAX/MSP e utilizou-se um interface RME fireface 800.

De forma a quantificar a rejeição à realimentação e a eficácia do filtro de igualização, foram realizados testes objectivos (Figura 5) simulando a fonte sonora acústica através de um altifalante (A).

Foram definidos vários valores de intensidade e atraso temporal para cada simulação de reflexão, num total de 49. A reflexão foi simulada com 7 diferentes tempos de atraso: 16ms; 32ms; 48ms; 64ms; 80ms; 96ms; 112ms a cada um corresponderam 7 intensidades diferentes: -3dB; -6dB; -9dB; -12dB; -15dB; -18dB; -21dB. Os testes foram repetidos 2 vezes, com e sem o circuito de cancelamento activo. A síntese sonora consistia em apenas uma reflexão e o sinal de excitação em um impulso DIRAC (*Dirac Delta Impulse*). As 96 medições foram feitas com um microfone de referência B&K 2260.

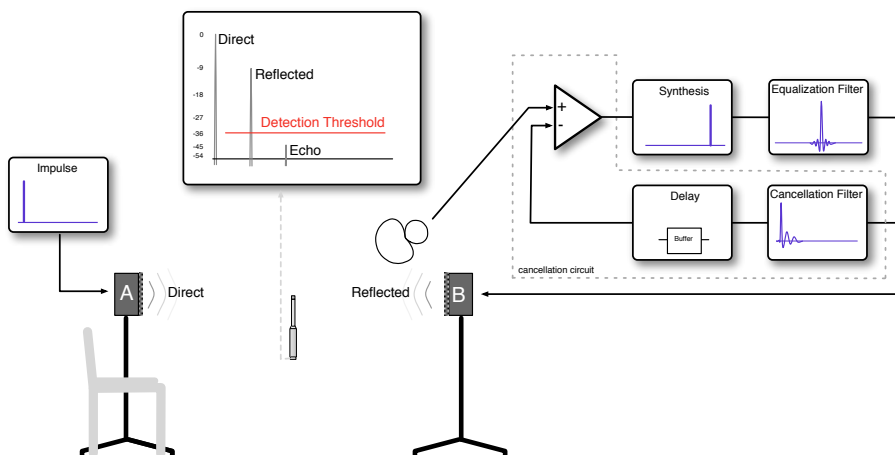


Figura 5 – Método de avaliação do sistema

6.1 Linearização do sistema com filtro inverso

Um requisito fundamental do sistema electroacústico é que ele tenha uma resposta uniforme em frequência e fase. Neste sentido, implementou-se um filtro com a resposta inversa à do sistema a corrigir [27].

O método para obtenção do filtro inverso do sistema está esquematizado na Figura 6. Foi utilizado um varrimento em frequência logarítmico no local da fonte sonora, através de um altifalante (A) igual ao que será utilizado para a reprodução (B). Desta forma, ao gravar através do microfone hipercardióide o sinal de excitação, estaremos a registar a função de transferência do altifalante e microfone em simultâneo. A resposta impulsiva que se obtém após a deconvolução caracteriza o nosso sistema. Todo o processamento de sinal para se obter o filtro inverso foi realizado com o software Aurora v4.3 desenvolvido por Angelo Farina [28].

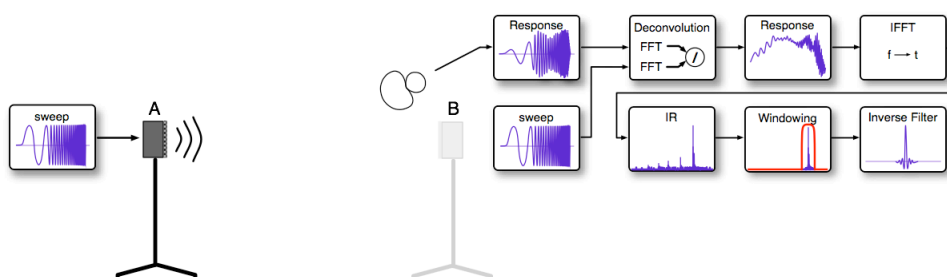


Figura 6 – Método de calibração do filtro inverso

Observando agora a Figura 7, verificamos que um auditor na posição B, irá ouvir uma réplica perfeita do sinal produzido. Em teoria e em espaço anecóico, o sinal que chega ao microfone omnidireccional proveniente de B, será igual ao proveniente de A, mas com tempos de chegada diferentes.

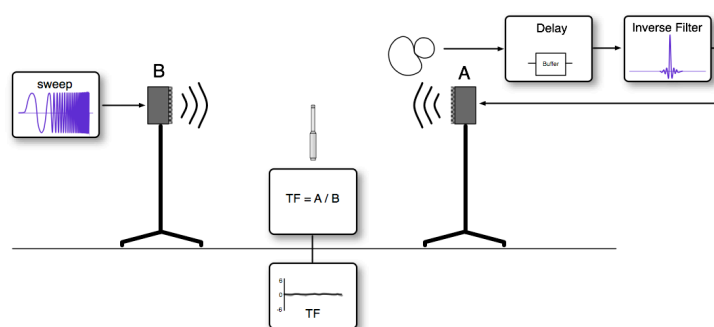


Figura 7 – Método de avaliação do filtro inverso

6.2 Resposta impulsiva para o circuito de cancelamento

O modelo proposto inclui um circuito que nos permite rejeitar a captação indesejada do sinal sintetizado. Isto só se torna possível porque conseguimos antecipadamente caracterizar o sinal que será reproduzido. Na Figura 8 apresentamos o método utilizado para se obter o filtro que nos permitirá reduzir a realimentação. A resposta impulsiva (IR) deste sistema permite-nos definir a forma como a síntese irá ser adquirida pelo microfone. Para o efeito, foi utilizado um varrimento logarítmico em frequência com 4 segundos de duração seguido de 2 segundos de silêncio. Após a deconvolução da resposta do sistema através do filtro inverso do varrimento, foi seleccionado apenas a parte linear da IR. A utilização de 8192 amostras @ 96 kHz permitiu obter uma boa resolução no domínio frequencial que corresponde a uma janela temporal de 85 ms. Desta forma, para além do cancelamento da

realimentação, e uma vez que não estamos na presença de um espaço totalmente anecóico, o filtro permite-nos atenuar também as reflexões reais do espaço semi-anecóico.

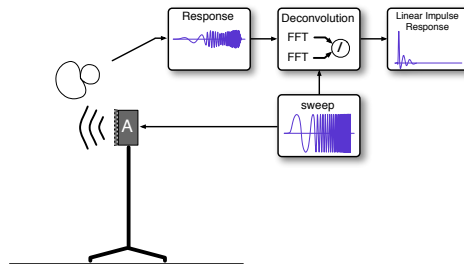


Figura 8 – Obtenção do filtro para o circuito de cancelamento

6.3 Alinhamento temporal do circuito de cancelamento

O último passo necessário antes que o sistema possa ser avaliado, consiste na compensação do atraso temporal que existe entre o altifalante e o microfone. A correção da latência do sistema é obrigatória para que no barramento de soma o cancelamento do eco seja maximizado. A calibração do atraso é realizada em tempo real, com resolução à amostra, utilizando um *patch* MAX/MSP programado para o efeito. Para uma maior precisão no alinhamento temporal foi utilizado a frequência de amostragem de 96 kHz, que corresponde ao período de 0.01ms para uma amostra. Nas Figuras 9 e 10 podemos observar a magnitude da realimentação com e sem o circuito de cancelamento. Estes resultados foram obtidos à saída do barramento de soma.

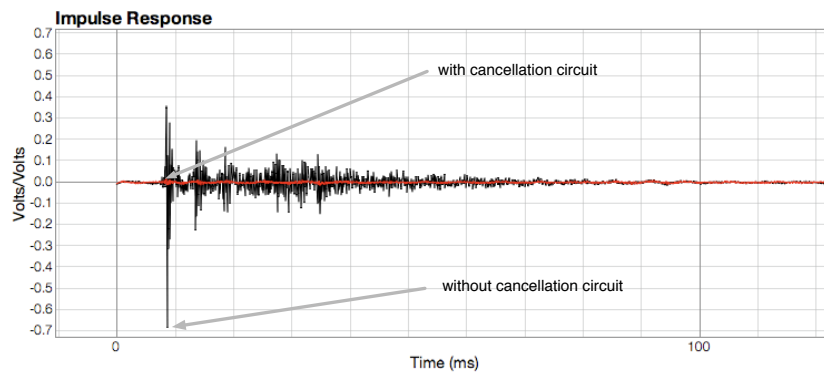


Figura 9 – Resposta impulsiva (Volt) da realimentação com e sem circuito de cancelamento

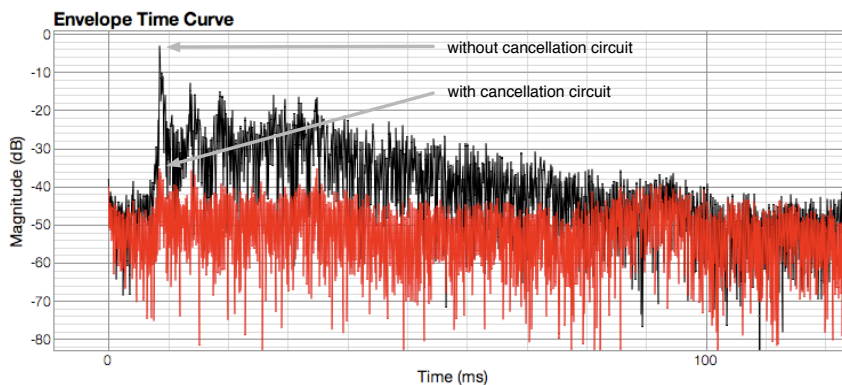


Figura 10 – Resposta impulsiva (dB) da realimentação com e sem circuito de cancelamento

7 Resultados

O resultado dos 98 testes realizados estão representados na Figura 11. Podemos observar que as primeiras reflexões não simuladas do espaço semi-aneecóico mascaram alguns resultados. As Figuras 12 e 13 apresentam os resultados da simulação de uma reflexão com 96ms de atraso e 9dB de atenuação. Sem o circuito de cancelamento activo podemos observar, a negro (Figura 12), que aos 192ms se verifica uma repetição da reflexão simulada, e cuja intensidade corresponde ao valor de rejeição do microfone de captação mais o valor de atenuação da simulação. Neste exemplo, em que intensidade da simulação é igual a -9 dB, a realimentação é apresentada ao músico 30 dB abaixo do som directo, sem o circuito de cancelamento activo. Com o circuito de cancelamento activo, observamos que existe uma atenuação adicional de 20 dB, o que perfaz neste exemplo uma atenuação total de 50 dB. Na Figura 13, observamos que não é visível qualquer realimentação do sistema aos 192ms, embora – em parte devido à dimensão do filtro – ainda permaneçam algumas reflexões que resultam da condição semi-aneecóica.

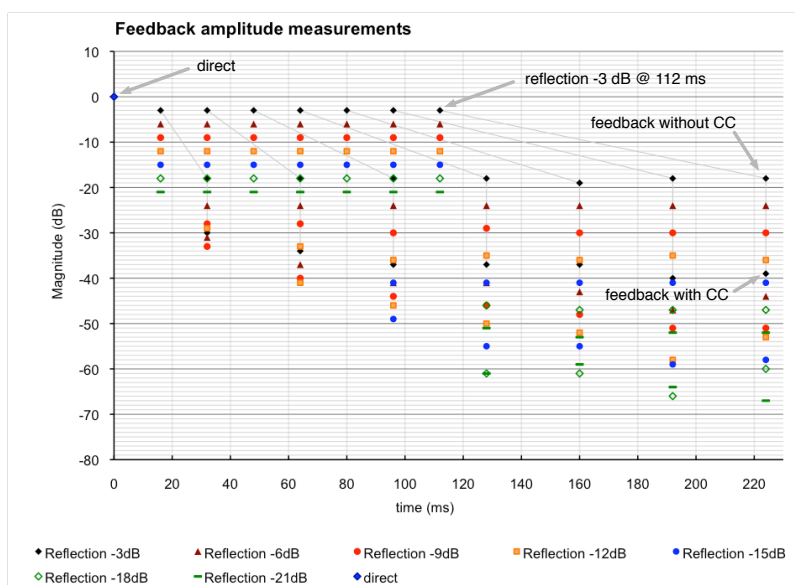


Figura 11 – Resultado das 98 medições realizadas

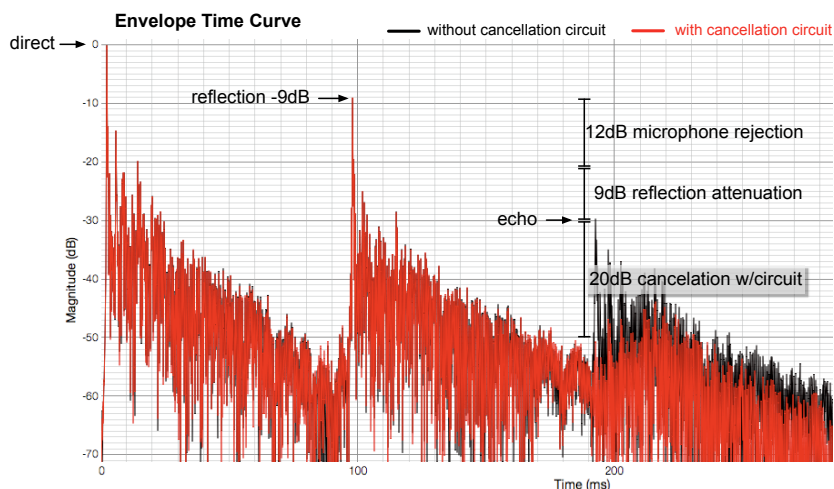


Figura 12 – Quantificação da realimentação para 1 reflexão (96 ms @ -9 dB): ETC

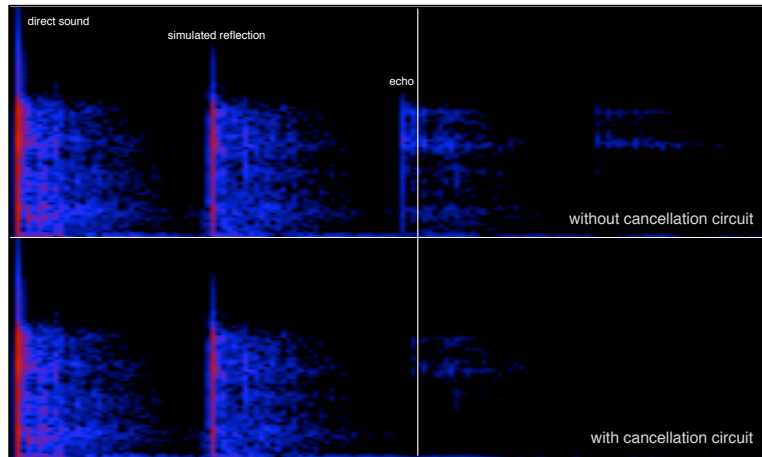


Figura 13 – Quantificação da realimentação para 1 reflexão (96 ms @ -9 dB): Sonograma

8 Discussão

Para se quantificar em detalhe a performance do circuito de cancelamento apresentado anteriormente, foi apenas utilizada a simulação de uma reflexão a partir de um impulso. O valor total de atenuação do sistema, independentemente da intensidade da simulação, é de 32 dB. Os autores consideram que este valor poderá ser superior para uma situação anecóica. Observando a Figura 10, em que os resultados são obtidos após o barramento de soma, verifica-se que existe a possibilidade do cancelamento chegar aos 42 dB (30 dB mais 12 dB de rejeição do microfone). Para melhor interpretar os resultados alcançados, comparam-se na figura 14 os valores obtidos com a curva de percepção humana [29]. Como se pode observar os valores obtidos da realimentação situam-se abaixo do limiar de percepção.

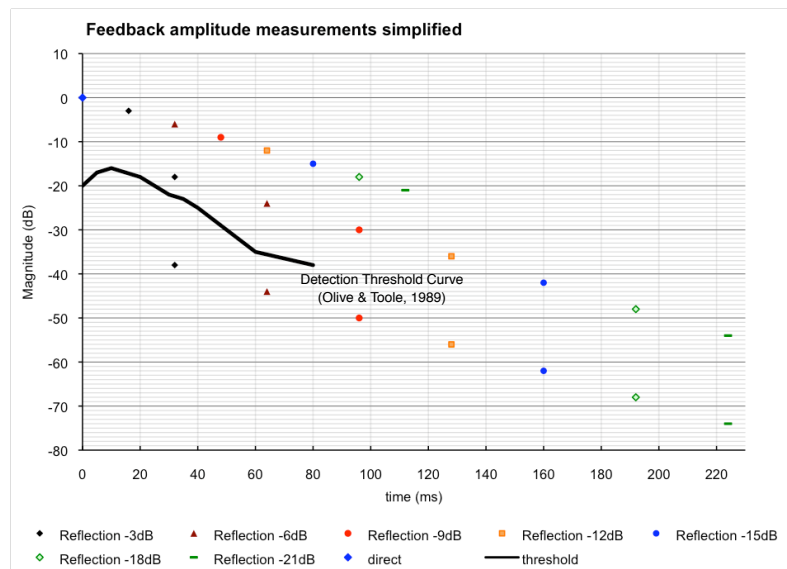


Figura 14 – Comparação dos resultados alcançados com a curva de sensibilidade humana

9 Conclusões

Na simulação de um campo sonoro as variáveis podem ser alteradas com grande precisão e de forma criteriosa, mas a qualidade sonora está quase sempre limitada. Uma vantagem da experimentação em laboratório reside na possibilidade de se poder variar rapidamente entre as diferentes condições acústicas, facilitando a comparação entre as performances tendo em conta a memória acústica humana de curta duração [30]. Neste sentido, o presente artigo descreve os primeiros passos do desenvolvimento de um modelo de auralização diferente para a performance em tempo real, em que os problemas associados a este tipo de sistema foram minimizados. As propriedades de radiação dos instrumentos musicais acústicos, a calibração para uma resposta em frequência uniforme e a realimentação electroacústica foram considerados como factores determinantes para a construção de uma realidade virtual que se deseja realista. A metodologia de calibração do sistema através de filtros inversos bem como a implementação de um circuito de cancelamento do eco acústico foi apresentada. A performance em tempo-real do sistema electroacústico foi avaliada de forma objectiva e os resultados demonstram um nível de cancelamento adequado à utilização proposta.

Os resultados obtidos através da avaliação do sistema sugerem que o modelo proposto pode ser implementado em laboratório para avaliar as condições acústicas preferenciais para os músicos e a forma como estas influenciam a performance musical. Encontra-se já em desenvolvimento a incorporação de várias reflexões sonoras para uma maior aproximação à realidade.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório de Acústica Musical e Serviços de Áudio da ESMAE pela cedência de equipamentos e espaços para a realização deste estudo.

Referências

- [1] Marshall, A.H., D. Gottlob, and H. Alrutz, *Acoustical conditions preferred for ensemble*. JASA, 1978. **64**: p. 1437-1442.
- [2] Barron, M., *The Gulbenkian Great Hall, Lisbon II: An Acoustic Study of a Concert Hall with Variable Stage*. J. Sound & Vibration, 1978. **59**: p. 481-502.
- [3] Gade, A.C., *Musicians ideas about room acoustic qualities*, 1981, University of Denmark.
- [4] Beranek, L.L., *Concert halls and opera houses : music, acoustics, and architecture*. 2nd ed2004, New York: Springer. xxii, 661 p.
- [5] Meyer, J., *Acoustics and the performance of music*. 5th ed2009, NY: Springer.
- [6] Ueno, K., K. Kato, and K. Kawai, *Musician`s Adjustment of Performance to Room Acoustics - Part II : Acoustical analysis of performed sound signals*, in *ICA, 19th International Congress on Acoustics2007*: Madrid.
- [7] Gade, A.C., *Investigations of musicians room acoustics condition in concert halls. Part I: Methods and laboratory experiment*. Acustica, 1989b. **69**: p. 194-195.
- [8] Ueno, K., et al., *Sound field simulation for stage acoustics using 6-channel system*. JASJ - Acoustical Science and Technology, 2001. **22**: p. 307-309.
- [9] Shankland, R.S., *Acoustical designing for performers*. JASA, 1979. **65**: p. 140-144.
- [10] Bolzinger, S., O. Warusfel, and E. Kahle, *A study of the influence of room acoustics on piano performance*. Journal de Physique IV, 1994. **4**.

- [11] Cederlof, M., *Podium acoustics for the symphony orchestra*, 2006, Royal Institute of Technology: Stockholm.
- [12] Chiang, W., S.-t. Chen, and C.-t. Huang, *Subjective assessment of stage acoustics for solo and chamber music performances*. *Acustica*, 2003. **89**: p. 848-856.
- [13] Gade, A.C., *Acoustical survey of eleven European Halls - a basis for discussion of halls in Denmark*, 1989a, Technical University of Denmark.
- [14] Genta, G., et al., *Investigation of Subjective Acoustical Attributes by Performers Through Ranking Data Analyses*. *Acustica*, 2009. **95**: p. 1060-1070.
- [15] Miller, J., *A subjective assessment of acoustic conditions for performers*, in *Institute of Environmental Engineering* 1987, Polytechnic of the South Bank: London.
- [16] Ueno, K., K. Kato, and K. Kawai, *Musician's Adjustment of Performance to Room Acoustics - Part I : Experimental performance and interview in simulated sound field*, in *ICA, 19th International Congress on Acoustics* 2007: Madrid.
- [17] Ueno, K. and H. Tachibana, *Cognitive modeling of musician's perception in concert hall*. *JASJ - Acoustical Science and Technology*, 2005. **26**: p. 156-161.
- [18] O'Keefe, J. *A preliminary study of reflected sound on stages*. in *ICA, 15th International Congress on Acoustics*. 1995. Trondheim, Norway.
- [19] Chiang, W., *Acoustical design of stages with large plane surfaces in rectangular recital halls*. *Acustica*, 2003. **64**(9): p. 863-884.
- [20] Dammerud, J.J., *Stage Acoustics for Symphony Orchestras in Concert Halls*, 2009, University of Bath. p. 210.
- [21] Gade, A.C., *Investigations of musicians room acoustics condition in concert halls. Part II: Field experiment and synthesis of results*. *Acustica*, 1989c. **69**: p. 249-262.
- [22] Dammerud, J.J., M. Barron, and E. Kahle. *Objective assessment of acoustic conditions on concert hall stages - limitations and new strategies*. in *ISRA, 2010 International Symposium on Room Acoustics*. 2010. Melbourne, Australia.
- [23] Ueno, K., et al., *Experimental study of the effect of early reflections on players by binaural simulation technique*. *JASJ - Acoustical Science and Technology*, 2000. **21**: p. 167-170.
- [24] Gade, A.C. *Acoustics for Symphony Orchestras; status after three decades of experimental research*. in *ISRA, 2010 International Symposium on Room Acoustics*. 2010. Melbourne, Australia.
- [25] Hansler, E. and G. Schmidt, *Acoustic Echo and Noise Control - A Practical Approach*, ed. Springer 2004.
- [26] Huang, Y. and J. Benesty, *Audio Signal Processing for Next Generation Multimedia Communication Systems* 2004, New York: Kluwer academic publishers.
- [27] Mourjopoulos, J., et al., *About room response equalization and dereverberation*. *IEEE*, 2005.
- [28] Farina, A. and A. Farina, *Real-Time Auralization Employing a Not-Linear, Not-Time-Invariant Convolver*, in *AES Convention 123*, AES, Editor 2007.
- [29] Toole, F.E., *Sound Reproduction - The Acoustics and Psychoacoustics of Loudspeakers and Rooms*, ed. Elsevier 2009: focal press.
- [30] Cook, P.R., *Music, Cognition and Computerized Sound: An Introduction to Psychoacoustics* 1999: MIT press.