

VW-SYSTEM — SISTEMA ELECTROACÚSTICO PARA AURALIZAÇÃO INTERACTIVA COM MÚSICOS: AVALIAÇÃO OBJECTIVA E SUBJECTIVA

PACS: 43.55.Hy

G. Almeida^{1,2}; H. Ribeiro¹; P. Guerra¹; O. Inácio¹

¹Laboratório de Acústica Musical da Unidade de Investigação em Música, Artes e Espetáculo da ESMAE (LAM | UNIMAE)

Rua da Alegria, 503 - 4000-045 Porto – Portugal

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

Rua Diogo de Botelho, 1327 - 4169-005 Porto - Portugal

E.mail: gustavoalmeida@esmae-ipp.pt; hugombribeiro@gmail.com; pe.guerra@gmail.com; octavioinacio@esmae-ipp.pt;

ABSTRACT

With the objective of studying the influence of stage acoustics on musical performance, Almeida & Inácio [1] developed an electroacoustic system for the interactive auralization with musicians (VW-system). This system takes into account the sound radiation directivity of musical instruments. In this paper the implementation of the VW-system as applied in a real performance space (theatre) is described. Its behaviour in relation to feedback is analysed, comparing the results obtained with the more common methodology of stage acoustics simulation using single point sound capture as described by Ueno [2]. The study also evaluates the subjective preferences of 29 soloists with regard to intensity of the first reflections and the JND (just noticeable difference) of the ST_{early} parameter.

RESUMO

Com o objectivo de estudar a influência da acústica do palco na performance musical Almeida & Inácio [1] desenvolveram um sistema electroacústico para auralização interactiva com músicos (VW-system) que é sensível à direccionalidade da radiação sonora dos instrumentos musicais. Neste artigo é descrita a implementação do VW-system num espaço de performance real (teatro) e analisado o seu desempenho face à realimentação, comparando os resultados com a metodologia mais comum de simulação da acústica do palco por captação pontual relatada por Ueno [2]. O estudo avalia também a preferência subjectiva de 29 solistas quanto à intensidade das primeiras reflexões e ao JND (diferença mínima perceptível) do parâmetro ST_{early} .

1. INTRODUÇÃO

As condições acústicas preferenciais para a audiência numa sala de concertos são hoje bem conhecidas e foram investigadas de forma sistemática durante o último século por Beranek [3], Barron [4], Schroeder [5], entre outros, permitindo-nos aceder a indicadores muito precisos para o projecto acústico e arquitectónico. Todavia, as condições acústicas óptimas para os

músicos no palco são ainda pouco claras. Pouco mais de 3 décadas passaram após se terem publicado os primeiros estudos sobre as condições acústicas preferenciais para os músicos em concerto. Contudo, os sistemas electroacústicos propostos na literatura para a auralização interactiva com músicos ainda apresentam sérias limitações. O elevado número de variáveis que se encontram em factores acústicos, psicoacústicos, musicais e mesmo não-auditivos, tem conduzido a diferentes abordagens metodológicas [6]. A simulação de reflexões sonoras através de altifalantes para avaliar a influência da acústica na execução musical foi inicialmente introduzida por Marshall [7] em 1978. Só em 1998, Yokoyama e Ueno [2] apresentaram um sistema electroacústico em laboratório, que permite a audição/simulação tridimensional dos eventos acústicos, por convolução em tempo real do som do instrumento com respostas impulsivas de uma determinada sala. Este sistema, reconhecido pela comunidade científica como moderno e avançado (ver [6]), enfrenta dificuldades na interacção acústica tridimensional, uma vez que a captação realizada ao instrumento continua a ser altamente direccionada. Assim, o sistema de Ueno [8-11] demonstra de forma inequívoca a sua principal limitação: não regista espacialmente o complexo padrão de radiação dos instrumentos acústicos. Mais ainda, a captação é efectuada bastante próxima do instrumento na tentativa de reduzir ao máximo a realimentação electroacústica provocada pela interacção entre microfone e altifalante, originando dificuldades na interacção com o músico.

Em 2012, Almeida & Octávio [1] propuseram um novo método de auralização em tempo real para músicos (VW-system). O presente artigo descreve o trabalho realizado na avaliação objectiva e subjectiva ao desempenho do sistema através da sua implementação num teatro. Em primeiro lugar, o ganho acústico máximo antes de realimentação foi avaliado e comparado com um sistema típico de captação pontual. Em segundo lugar, procedeu-se à identificação dos valores do limiar de percepção da intensidade das primeiras reflexões no palco para 5 diferentes tipos de instrumentos. Depois, realizou-se uma nova experiência para avaliar o nível de intensidade preferencial das primeiras reflexões tendo em conta o tipo de instrumento musical. Por último, comparou-se o VW-system com um sistema de captação pontual.

2. O VW-SYSTEM

Para simular um campo acústico em tempo real para performance musical foi proposto em 2012 um sistema electroacústico denominado por VW-system [1]. Este sistema é composto por vários subsistemas, cada um responsável por captar um eixo de radiação do instrumento musical, processar e reproduzir a correspondente reflexão sonora tentando simular o comportamento de uma parede real. Cada subsistema inclui também a correção da resposta em frequência e um circuito de cancelamento do eco (ver Figura 1). O VW-system é um sistema de interacção e interactivo, i.e. cada subsistema para além de “responder” ao estímulo musical (som directo) também irá reagir ao som reflectido dos outros subsistemas, idêntico ao que acontece na realidade. Assim, a síntese é constituída apenas por uma reflexão ao invés do sistema proposto por Ueno que se baseia na convolução da captação por respostas ao impulso de salas reais. No estado actual de desenvolvimento do sistema, assume-se como mais relevante a radiação das reflexões (aqui consideradas como especulares) provenientes das paredes que conformam o palco, não se tendo incorporado as restantes reflexões de ordem superior provenientes de outras superfícies da sala. A calibração e operacionalidade do sistema são realizadas através da aplicação MAX-MSP.

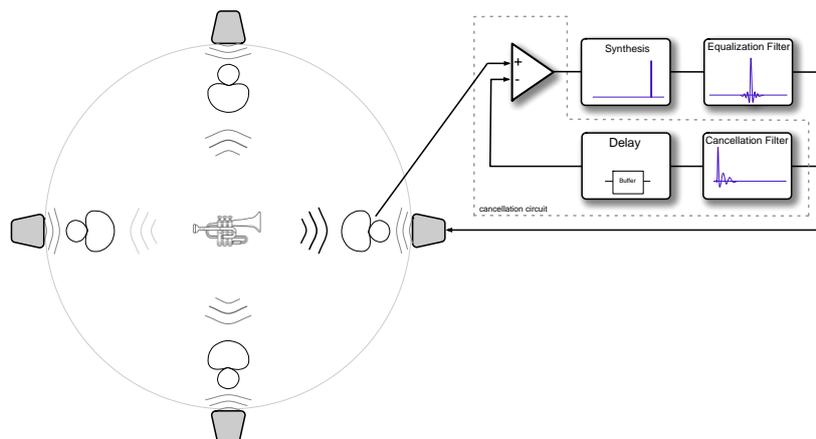


Figura 1. Diagrama de blocos do VW-system e imagem da montagem no palco do teatro

3. HIPÓTESES

O trabalho experimental que a seguir se descreve foi realizado com o objectivo de testar as seguintes hipóteses:

- Se a implementação do modelo VW-system para auralização interactiva com músicos permite obter valores de ganho acústico antes de realimentação superiores aos sistemas tradicionais (captação pontual), mesmo utilizando mais microfones e distâncias superiores ao instrumento musical.
- Se o limiar de percepção da intensidade das primeiras reflexões no palco depende do tipo de instrumento musical uma vez que a relação da intensidade percebida do som direto e do som reflectido é diferente entre os diferentes tipos de instrumentos.
- Se o valor preferencial da intensidade das primeiras reflexões no palco depende do tipo de instrumento musical uma vez que a relação da intensidade percebida do som direto e do som reflectido é diferente entre os diferentes tipos de instrumentos.
- Se existe uma intensidade máxima de reforço sonoro a partir da qual as primeiras reflexões especulares deixam de ser benéficas.
- Se a captação do instrumento em vários pontos, um ponto para cada reflexão, aumenta a naturalidade das reflexões geradas, ao invés da captação pontual próxima do instrumento.
- Se as características de direcionalidade da radiação sonora de um instrumento acústico influenciam os resultados obtidos quando se procede à simulação com apenas um ponto de captação.

4. TRABALHO EXPERIMENTAL

4.1 Procedimento Geral

A montagem do sistema foi realizada no palco do Teatro Helena Sá e Costa (THSC), situado na Escola Superior de Música, Artes e Espetáculo do Porto (ESMAE). Foram utilizados 4 subsistemas para se proceder à simulação das paredes traseira, direita, esquerda e tecto, recriando electroacusticamente uma concha acústica virtual. A reflexão frontal bem como a reflexão do chão não são simuladas assumindo-se as reflexões reais provenientes da sala e do pavimento, respectivamente. Os limites traseiros e laterais do palco foram encurtados para os 8 metros nas laterais e 6 metros no limite traseiro com cortinas (distâncias referenciadas ao ponto de escuta) de forma a diminuir a influência das paredes reais do palco durante os testes. Na simulação das reflexões foi feita a correspondência com estas distâncias, por inclusão de um atraso temporal na simulação da reflexão virtual. Já a reflexão proveniente do tecto era desprezável uma vez que o teatro tem torre de cena. Assim a reflexão simulada correspondeu à distância típica de uma canópia suspensa para a dimensão do teatro utilizado, cerca de 5.67

metros — distância referenciada ao ponto de escuta de um músico sentado. A distância das colunas ao ponto de escuta foi de 2 metros tal como o sistema apresentado em [6]. Já os microfones de captação do VW-system estavam a cerca de 1,5 metros do ponto de escuta. Simularam-se reflexões especulares, entrando em consideração com a dispersão geométrica e a interação entre os vários altifalantes. Foram calibrados 9 *presets* correspondentes a diferentes intensidades da reflexão, numerados do menos intenso ao mais intenso com um incremento de 3 dB entre eles em cada reflexão. O valor de intensidade de cada reflexão simulada corresponde ao valor em dB medido no local de escuta. Na Tabela 1 podemos observar os valores que foram utilizados nas várias simulações.

Na tentativa de criar uma amostra ampla e abrangente, obteve-se a colaboração de três fagotistas, quatro tubistas, oito violetistas, cinco cantores e nove clarinetistas num total de 29 músicos. A grande maioria dos instrumentistas é estudante do curso superior de instrumento na ESMAE, sendo que três dos instrumentistas sujeitos aos testes são músicos profissionais. Para a realização dos testes, o músico, no centro do palco, executa uma melodia previamente definida, dependendo do instrumento que toca. Os excertos musicais foram criteriosamente escolhidos: fácil execução/articulação; curta duração, aproximadamente 10 segundos; tessitura e dinâmica representativa do instrumento; articulação *staccato/legato*.

Presets	Reflexão Tecto		Reflexão Parede Traseira		Reflexão Parede Esquerda		Reflexão Parede Direita		ST _{early} (dBA)
	Intensidade (dB)	Atraso (ms)	Intensidade (dB)	Atraso (ms)	Intensidade (dB)	Atraso (ms)	Intensidade (dB)	Atraso (ms)	
OFF	-	-	-	-	-	-	-	-	-16
1 (VW-system)	-35	33	-37	35	-38	47	-38	47	-14
2 (VW-system)	-32		-34		-35		-35		-14
3 (VW-system)	-29		-31		-32		-32		-14
4 (VW-system)	-26		-28		-29		-29		-13
5 (VW-system)	-23		-25		-26		-26		-12
6 (VW-system)	-20		-22		-23		-23		-11
7 (VW-system)	-17		-19		-20		-20		-9
8 (VW-system)	-14		-16		-17		-17		-6
8 (Pontual)	-14		-16		-17		-17		-6
9 (VW-system)	-11	-13	-14	-14	-3				
9 (Pontual)	-11	-13	-14	-14	-1				

Tabela 1 - Correspondência entre *Presets*, Intensidade e Atraso de Reflexões Especulares e ST_{early} dBA

De quatro experiências realizadas com músicos, três basearam-se em testes A/B de comparação entre *presets* e uma num teste A/B/X. O tempo médio despendido com cada instrumentista para a realização das quatro experiências foi de 30 minutos, onde se inclui cerca de 10 minutos para a explicação dos procedimentos e aquecimento instrumental. Durante a realização dos testes nenhum outro participante se encontrava no local.

4.2 Experiência 1 – Avaliação Objectiva do Ganho Acústico antes de Realimentação: VW-system vs Captação Pontual

Após a definição dos *presets* de simulação foram medidos os valores do parâmetro ST_{early} segundo a norma enunciada por Gade [12]. Para as medições foi utilizado o método do varrimento em frequência exponencial (ESS – *Exponential Swept Sine*) através de uma fonte dodecaédrica e registada a resposta impulsiva com um microfone de medição a 1 metro da fonte. Os valores do parâmetro ST_{early} foram obtidos através do *software* Aurora e são apresentados em dBA. Uma vez que o campo sonoro simulado está compreendido entre 20 e 100ms o parâmetro ST_{early} — formulado como:

$$ST_{early} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{E(20-100 \text{ ms})}{E(0-10 \text{ ms})} \right) \text{ dB}$$

em que E é o integral da pressão sonora quadrática da resposta impulsiva medida nos intervalos de tempo indicados em subscrito, surge como o mais adequado, pois compara a energia do som directo (0 – 10ms) com a energia das primeiras reflexões até aos 100ms. Tem vindo a ser demonstrado [6] uma forte correlação entre o parâmetro ST_{early} e a sensação que o músico tem de ouvir o seu instrumento sem esforço, i.e. um som bem suportado com facilidade de projecção sonora.

Para simular um sistema de captação pontual idêntico ao referenciado em [2] para fins comparativos o sistema foi reconfigurado, e adicionou-se um novo microfone colocado frontalmente bastante mais próximo da fonte dodecaédrica (ver Figura 2a). A estrutura de ganho do microfone foi calibrada de forma a obter os mesmos valores de ST_{early} nos dois sistemas (ver Tabela 1 *preset 8*). O microfone de captação do sistema pontual foi deixado propositadamente durante todos os testes com os músicos, como se pode ver na Figura 2b.

O objectivo desta experiência era avaliar a hipótese a) uma vez que a utilização de vários microfones mais afastados da fonte sonora e em simultâneo mais próximos dos altifalantes podem comprometer o ganho acústico potencial do sistema, e assim, impossibilitar a utilização do VW-system para níveis de ST_{early} elevados.



Figura 2. Testes realizados: objectivos e subjectivos: a) medição do parâmetro ST_{early} ; b) testes subjectivos

Observando a resposta impulsiva dos dois sistemas para o *preset 8* — Figura 3, concluiu-se que ambos os sistemas apresentam um comportamento semelhante no que respeita ao tempo e intensidade dos eventos simulados. Note-se que o valor de ST_{early} para o *preset 8* é de aproximadamente -6dB, o que equivale a um valor bastante elevado. Embora não tenha sido utilizado nas experiências com músicos — devido à excessiva amplificação — o *preset 9* simulado através do VW-system exibe um comportamento estável ao longo do tempo e livre de realimentação. Já a auralização do *preset 9* através do modelo de captação pontual torna-se inviável e a instabilidade devido à realimentação é bem visível no gráfico da Figura 3.

4.3 Experiência 2 – Limiares de Percepção das Primeiras Reflexões

A primeira experiência subjectiva com músicos serviu para testar a hipótese b). Nesse sentido foi realizado um teste A/B para avaliar o limiar de percepção das primeiras reflexões simuladas (situação B) face à condição acústica real do teatro — ausência de simulação (situação A). O primeiro *preset* foi sempre o 8 — o de maior intensidade sonora — e o teste terminava quando os músicos não percepcionavam diferenças entre o sistema ligado e desligado.

Dos vários naipes testados, as tubas obtiveram o limiar de perceptibilidade mais baixo. Nas violas encontra-se o desvio-padrão mais elevado e o naipe dos clarinetes tem o limiar mais alto. No entanto, a média de perceptibilidade de todos os naipes corresponde a um ST_{early} de -11 dBA e entre naipes o valor oscila no máximo -1,64 dBA. Uma vez que os músicos com o

sistema desligado estavam sujeitos a um valor ST_{early} de -16dBA verificou-se em média, uma diferença mínima de percepção (JND) de 5 dBA.

As diferenças obtidas entre os diferentes naipes de instrumentos indiciam que o limiar de percepção da intensidade das primeiras reflexões no palco depende do tipo de instrumento musical uma vez que a relação da intensidade percebida do som direto e do som reflectido é diferente entre os diferentes tipos de instrumentos. As pequenas variações no JND de cada naipe podem ser devidas à radiação sonora do instrumento. Mudanças na frase melódica tocada pelo instrumentista revelaram que o seu limiar de perceptibilidade do sistema decrescia e aumentava, dependendo das notas escolhidas e principalmente da intensidade com que eram tocadas. Os músicos foram convidados a improvisar sempre que suscitasse dúvidas no final dos testes. O parâmetro intensidade surgia como bastante decisivo para a percepção do sistema por parte dos músicos, aspecto que pode ser investigado em futuras experiências.

4.4 Experiência 3 – Intensidade Preferencial das Primeiras Reflexões

Após a obtenção dos valores mínimos de intensidade percebidos pelos músicos procedeu-se a uma nova experiência com o objectivo de testar as hipóteses c) e d). O teste *A/B* iniciava-se no limiar de audibilidade (experiência 2) e terminava quando a situação preferencial fosse a condição *A*. Ao músico era pedido que seleccionasse a condição acústica mais favorável tendo em vista uma situação de concerto solo.

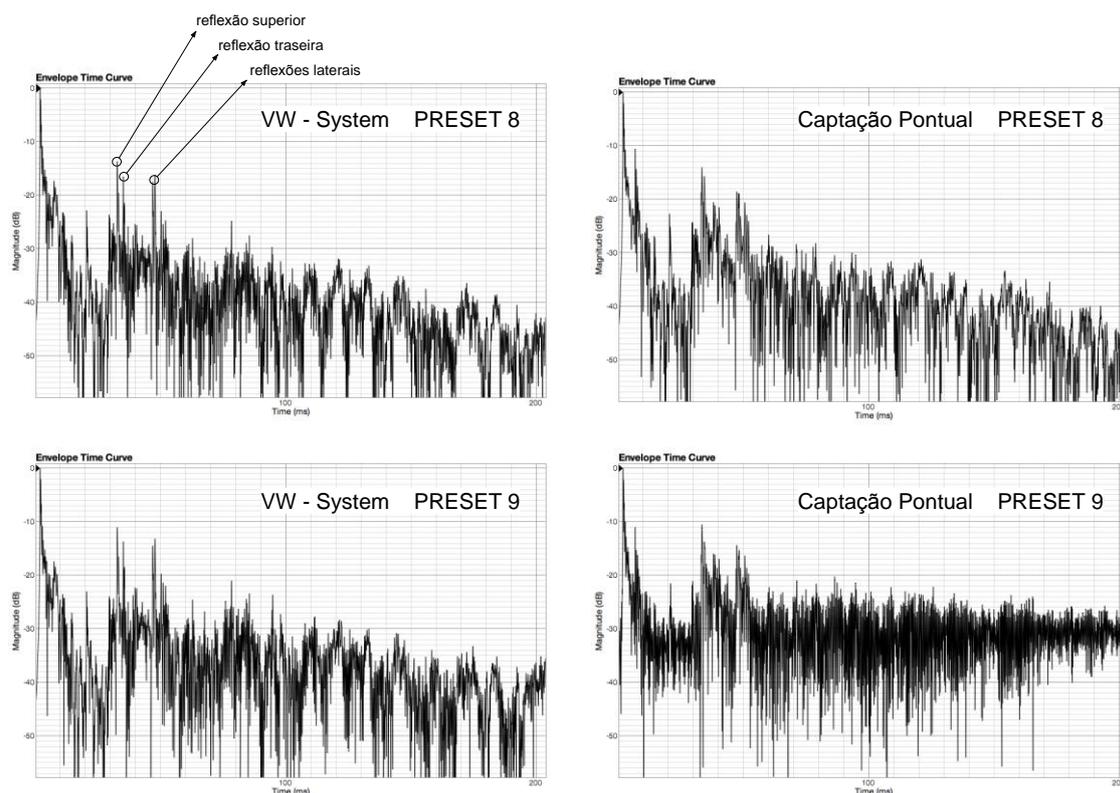


Figura 3. Comparação do desempenho dos dois sistemas para a mesma situação de simulação

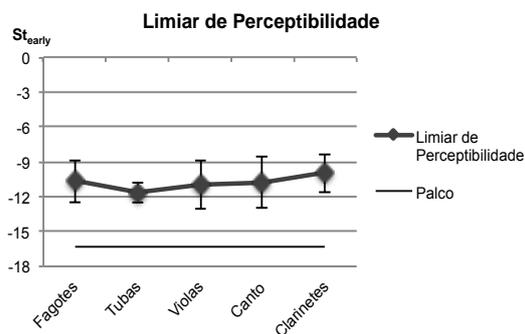


Figura 4. Limiar de perceptibilidade para cada naipes em ST_{early} dBA

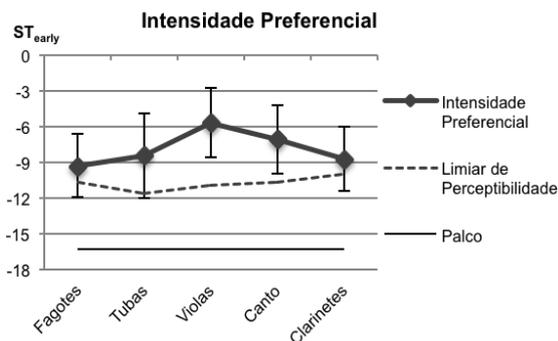


Figura 5. Intensidade preferencial (ST_{early})

O naipes das violas e canto foram os que apresentaram preferência por um valor de ST_{early} mais elevado. Comparando com o limiar de perceptibilidade, é possível verificar que no naipes das violas e canto estes valores estão bastante distanciados. No entanto, verifica-se que o desvio-padrão de todos os naipes é elevado e, por conseguinte, a escolha de intensidade preferencial é uma questão de sensibilidade muito individualizada. Para os 29 instrumentistas solo que realizaram esta experiência o valor preferencial de ST_{early} situa-se entre os -6 e os -9dB. Comparando os resultados obtidos às hipóteses que se pretendiam testar, é importante salientar que a elevada intensidade preferencial dos naipes das violas e canto pode ser justificada através do tipo de instrumento musical executado e radiação sonora do mesmo, bem como pela necessidade de um ST_{early} dBA mais elevado devido às diferenças na percepção de intensidade entre som directo e reverberado, hipóteses c) e d). Também é curioso verificar que os naipes que preferem um menor valor de ST_{early} são instrumentos de sopro.

4.5 Experiência 4 – Avaliação Subjectiva do VW-SYSTEM por Parte dos Músicos

O objectivo inicial desta experiência foi recolher as opiniões dos músicos em relação ao comportamento global do VW-System. A experiência consistiu numa comparação A/B, sendo a condição A intensidade preferencial da experiência 3, e a B sendo o sistema desligado. Esta metodologia de comparação entre a preferência do músico e o sistema desligado teve como único objectivo fornecer ao músico o contraste entre as duas situações, de forma a este conseguir verbalizar de uma forma mais clara um termo para a sensação percebida com o sistema VW-System. Ao contrário do que seria de esperar, muitos dos músicos preferiram o sistema desligado, quando na experiência 3 foram favoráveis a uma intensidade de campo sonoro mais elevada. Desta forma, os resultados apresentados são referentes à percentagem de músicos que optaram pela intensidade preferencial em contraste com o sistema desligado.

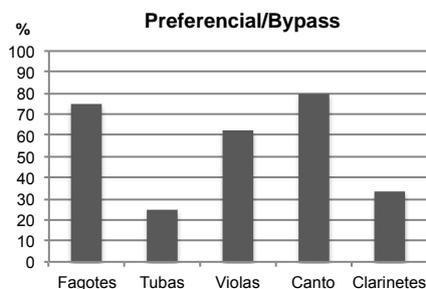


Figura 6. Percentagem de músicos que optou pela intensidade preferencial

Pela análise do gráfico de resultados, que representa a percentagem de instrumentistas de cada naipes que preferiu o *preset* escolhido na experiência 3 ao sistema desligado, verificou-se

que os fagotes, as violas e os cantores se mantiveram coerentes, enquanto que as tubas e os clarinetes preferiram maioritariamente o sistema desligado.

Um dos aspectos a ter em conta, vendo estes resultados, é a falta de experiência dos instrumentistas em causa, algo que também é relatado em [13]. Sendo na maioria estudantes, muitos estão habituados a uma rotina de estudo e correção do erro, sendo que com o sistema desligado têm uma melhor noção do som do instrumento a que estão habituados. Em muitos dos músicos notou-se também uma maior preocupação na interpretação do trecho musical, do que em ouvir as diferenças pertinentes para o questionário.

4.6 Experiência 5 – Influência da Directividade do Instrumento nas Condições Acústicas Preferenciais dos Instrumentistas Solo

Nesta experiência pretendeu-se testar as hipóteses e) e f), e ainda perceber se os músicos conseguiram perceber a diferença entre uma captação pontual (Ueno) do seu instrumento, reproduzida da mesma forma pelos 4 altifalantes que criam o campo, e a captação tendo em conta a radiação do instrumento (VW-System), com os microfones colocados na proximidade dos altifalantes, simulando paredes virtuais. Para isso escolheu-se um *preset* com a intensidade calibrada entre a captação pontual e o VW-System, e os músicos foram sujeitos a um teste A/B/X. Interpretaram um pequeno trecho musical sujeito a uma captação pontual (Ueno), situação A, e de seguida ao VW-System, situação B. No final foram sujeitos a uma situação X, na qual o objectivo era perceber se estaria simulada a situação A ou B. Numa segunda parte do teste, os músicos responderam à seguinte questão: “Selecione a situação que considera mais natural à execução musical, A ou B.” Analisando o gráfico da Figura 7, é possível verificar que a percentagem de reconhecimento dos sistemas, por parte dos fagotistas e violetistas, se encontra bastante acima dos 50%, nas tubas situa-se nos 50%, e nos clarinetes e canto o reconhecimento desce bastante abaixo dos 50%, situando-se pelos 20%. Em relação à preferência tendo em conta a naturalidade da execução musical, os resultados dividem-se. A preferência pelo VW-System é notória nos fagotistas, cantores e clarinetistas. Nos tubistas as escolhas dividem-se, sendo que as preferências se encontram nos 50%. Nas violas o sistema de captação pontual é preferido, sendo que há uma grande percentagem de indivíduos que não conseguem escolher entre os 2 sistemas. Esta indecisão é também registada nos cantores.

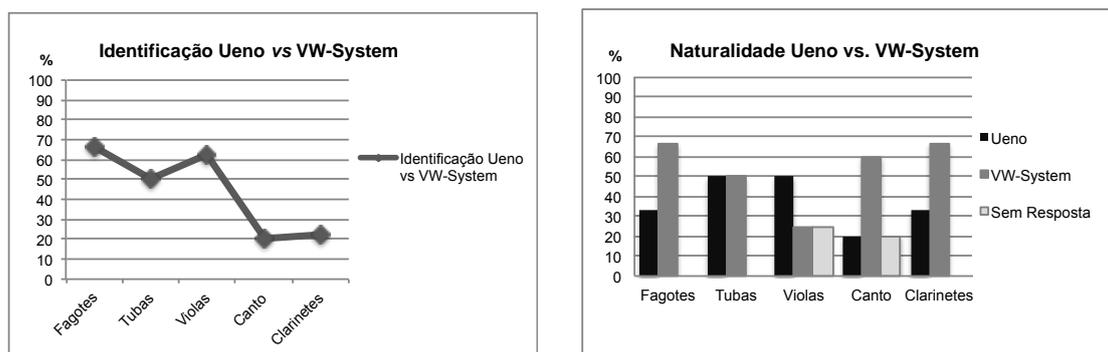


Figura 7 – a) Percentagem de músicos que identificaram a chave correcta e b) Preferência face à naturalidade de cada sistema

Os resultados da situação A/B/X podem dever-se a diversos factores, sendo eles as propriedades de radiação de cada instrumento e o trecho musical tocado, sendo que em alguns casos o reconhecimento foi mais fácil tocando apenas uma determinada nota ou com uma articulação diferente e tendo em conta a fadiga do músico, sendo este o último de quatro testes. A discrepância de preferência entre as tubas e violas e os restantes instrumentos pode

dever-se a diversos factores, entre eles as características de radiação de cada instrumento em particular, as características tímbricas dos mesmos, a frase musical tocada, a pouca experiência dos intérpretes a tocar a solo na maioria dos casos e a fadiga física, nomeadamente auditiva, no final dos quatro testes.

5. CONCLUSÕES

A utilização de vários microfones num sistema electroacústico para auralização interactiva com músicos, com o objectivo de registar com maior precisão a radiação dos instrumentos musicais, veio a demonstrar-se possível. O VW-system conseguiu alcançar um ganho acústico antes de realimentação superior ao método tradicional de captação pontual. As opiniões experientes dos três únicos músicos profissionais que participaram nos testes apontaram para uma sensação de maior envolvimento e naturalidade quando se mudava do sistema de captação pontual para o VW-system. Tendo sido simulado um atraso temporal das paredes laterais igual, sucede que através do sistema de captação pontual o músico no centro acústico tem uma percepção de maior coerência dos tempos de chegada. Esta situação não se verifica tanto através do VW-system uma vez que a diferença da energia radiada às várias frequências é registada por diferentes microfones, beneficiando a liberdade de movimentos dos músicos.

Identificou-se uma diferença mínima de percepção (JND) de 5dB no parâmetro ST_{early} para uma referência de -16dBA.

Obteve-se um valor de ST_{early} preferencial compreendido entre -6 a -9dBA. Estes resultados confirmam a necessidade de mais energia das primeiras reflexões no palco por parte dos instrumentistas a solo do que para os músicos de orquestra, onde foi identificado um ST_{early} óptimo de -12dB [12].

Parece ser evidente que a investigação no campo da acústica do palco necessita de mais verificação experimental, nesse sentido iremos continuar a implementar e testar o VW-system com outros tipos de instrumentos.

AGRADECIMENTOS

A todos os músicos que participaram nos testes, um agradecimento pelo contributo, paciência e espírito crítico. Um especial agradecimento à equipe do Teatro Helena Sá e Costa, Laboratório de Acústica Musical e Serviços de Áudio da ESMAE que tornaram possível a realização deste estudo.

REFERÊNCIAS

- [1] Almeida, G. & Inácio, O. 2012. *Influência da Acústica do Palco na Performance Musical: Sistema Electroacústico para Auralização Interactiva com Músicos*. Proceedings of the VIII Iberoamerican Acoustics Congress, 1-3 Évora - Portugal. 232.
- [2] Yokoyama, S., Ueno, K., Sakamoto, S. & Tachibana, H. 1998. *Sound field simulation using a 6 ch. directional microphone system*. Spring Meet. Acoust. Soc. Jpn. 833-834.
- [3] Beranek, L. L. 2004. *Concert halls and opera houses : music, acoustics, and architecture*, New York, Springer.
- [4] Barron, M. 2010. *Auditorium Acoustics and Architectural Design - 2nd Ed.*, London.
- [5] Schroeder, M. R., Gottlob, D. & Siebrasse, K. F. 1974. *Comparative study of European concert halls: correlation of subjective preference with geometric and acoustic parameters*. JASA, 56, 1195-1974.

- [6] Gade, A. C. 2010. *Acoustics for Symphony Orchestras; status after three decades of experimental research*. ISRA, 2010 International Symposium on Room Acoustics, 29-31 Melbourne, Australia.
- [7] Marshall, A. H., Gottlob, D. & Alrutz, H. 1978. *Acoustical conditions preferred for ensemble*. JASA, 64, 1437-1442.
- [8] Ueno, K., Katsuhiko, Y., Hideki, T. & Takahiko, O. 2001. *Sound field simulation for stage acoustics using 6-channel system*. JASJ - Acoustical Science and Technology, 22, 307-309.
- [9] Ueno, K. & Tachibana, H. 2003. *Experimental study on the evaluation of stage acoustics by musicians using a 6-channel sound simulation system*. JASJ - Acoustical Science and Technology, 24, 130-138.
- [10] Ueno, K., Kato, K. & Kawai, K. 2007. *Musician's Adjustment of Performance to Room Acoustics - Part I : Experimental performance and interview in simulated sound field*. ICA, 19th International Congress on Acoustics. Madrid.
- [11] Ueno, K., Yokoyama, S. & Tachibana, H. 2007. *3-D Sound field simulation of concert halls for performing musicians*. ICA, 19th International Congress on Acoustics. Madrid.
- [12] Gade, A. C. 1989b. *Investigations of musicians room acoustics condition in concert halls. Part I: Methods and laboratory experiment*. *Acustica*, 69, 194-195.
- [13] Gade, A. C. 2013. *Subjective and objective measures of relevance for the description of acoustics conditions on orchestra stages*. Proceedings of the International Symposium on Room Acoustics, 9-11 June, Toronto, Canada.