

FIA 2020/22

XII CONGRESSO/CONGRESO IBEROAMERICANO DE ACÚSTICA
XXIX ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA - SOBRAC

Florianópolis, SC, Brasil

AcousticCanvas: um simulador de câmeras acústicas de código aberto para ambientes reverberantes

Barbosa, B. P.¹; Santos, T. O.²; Miranda, I. D. S.³; Lima, A. C. C.⁴

^{1,4} Departamento de Engenharia Industrial, Universidade Federal Da Bahia, Salvador, BA, Brasil, {breno.prazeres,acdcl}@ufba.br

^{2,3} Divisão de Sistemas Elétricos e Computacionais, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, BA, Brasil, taylane.oliveirast@aluno.ufrb.edu.br, igordantas@ufrb.edu.br

Resumo

Câmeras acústicas são dispositivos que permitem a visualização da origem e da intensidade de ondas sonoras através da formação de imagens acústicas e, geralmente, são aplicadas no desenvolvimento de produtos e no monitoramento de equipamentos industriais. Diversos parâmetros devem ser considerados durante a aquisição ou projeto de uma câmera acústica, relacionados ao arranjo de microfones, às fontes sonoras e às características do ambiente. Por conta disso, a simulação de câmeras acústicas é uma etapa essencial para utilização adequada desta tecnologia. Os poucos simuladores disponíveis possuem aplicabilidade restrita, como ambientes subaquáticos, ou não são adequados para ambientes reverberantes. Isso dificulta a realização de análises de adequação de uma câmera acústica a uma nova aplicação, bem como no desenvolvimento de novas câmeras. Este trabalho descreve o projeto AcousticCanvas, um simulador de câmeras acústicas de código aberto, voltado principalmente para aplicações em ambientes reverberantes, como salas, auditórios e afins. Os efeitos da reverberação foram simulados utilizando o método *Image-Source*, no qual a reverberação do ambiente pode ser variada por meio de alterações nos coeficientes de reflexão das paredes. Para a geração das imagens acústicas, o usuário dispõe de uma variedade de algoritmos de *beamforming*, como o *Delay-And-Sum*, *Minimum Variance*, *CLEAN*, entre outros. O simulador desenvolvido permite: utilização de múltiplas fontes e arranjos de microfones com posicionamento espacial parametrizável; definição do tipo e das dimensões do ambiente; utilização de sinais senoidais, arquivos de áudios ou ruído branco; controle da relação sinal-ruído; controle de reverberação; aumento de desempenho com o uso de processamento paralelo, entre outras funcionalidades. Os desafios e os trabalhos futuros relacionados ao projeto AcousticCanvas também são descritos.

Palavras-chave: Câmeras acústicas, simulador, reverberação, arranjo de microfones.

PACS: 43.60.Lq, 43.58.Ta, 43.60.Gk.

AcousticCanvas: an open-source acoustic camera simulator for reverberant environments

Abstract

Acoustic cameras are devices that allow the visualization of the origin and intensity of sound waves through the formation of acoustic images. These devices are generally applied to product development and industrial equipment monitoring. Several aspects must be considered during the acquisition or design of an acoustic camera, such as the arrangement of microphones, the sound sources, and the characteristics of the environment. Because of this, the simulation of acoustic cameras is an essential step for the proper use of this technology. The few simulators available have restricted applicability, such as underwater environments, or are not suitable for reverberant environments. This makes it difficult to carry out analyses of acoustic camera suitability to a new application as well as the development of new cameras. This work describes the AcousticCanvas project, an open-source acoustic camera simulator, aimed mainly at applications in reverberant environments, such as halls, auditoriums, and the like. The effects of reverberation are simulated using the *Image-Source* method, in which the reverberation of the environment can be varied through changes in the reflection coefficients of the walls. For the generation of acoustic images, the user has a variety of beamforming algorithms, such as *Delay-And-Sum*, *Minimum Variance*, *CLEAN*, among others. The proposed simulator allows to: build setups with multiple sources and microphone arrays; define the type and the dimensions of the environment; use sinusoidal signals, audio files, or white noise; control the signal-to-noise ratio and reverberation level; increase the simulator performance through parallel processing; among other features. The challenges and future work related to the AcousticCanvas project are also described.

Keywords: Acoustic cameras, simulator, reverberation, microphone array.



1. INTRODUÇÃO

Com o avanço e a miniaturização dos dispositivos digitais, vários fabricantes do setor de acústica lançaram no mercado modelos de câmeras acústicas para visualização de fontes sonoras. Estes equipamentos consistem em um arranjo de microfones, uma câmera ótica e um sistema de aquisição de dados. A imagem do ambiente, geralmente em preto e branco, é sobreposta pela imagem acústica, cujas cores estão associadas à intensidade do campo sonoro [1].

Dentre as inúmeras aplicações de câmeras acústicas, podem-se destacar a localização e redução de ruídos [2, 3], monitoramento de equipamentos industriais [4, 5], aeroacústica [6], medições acústicas [7] e localização de fontes sonoras [8]. Recentemente houveram avanços no campo do imageamento acústico, principalmente em relação aos algoritmos de *beamforming*, principal técnica utilizada neste contexto. Pesquisas também vem sendo desenvolvidas a fim de aprimorar os resultados em ambientes reverberantes [9, 10].

Diante da diversidade de algoritmos, geometrias e cenários de uso, é essencial utilizar simulação em projetos envolvendo câmeras acústicas. Em especial, essa ferramenta é fundamental na concepção de novos modelos de câmeras acústicas, reduzindo o ciclo de desenvolvimento.

Entre os simuladores de câmeras acústicas encontrados na literatura existem alguns projetados para ambientes subaquáticos [11, 12]. A relevância neste cenário é a capacidade destes dispositivos de gerar mais informações úteis em ambientes de águas turvas do que os sensores tradicionais.

Sarrdj [13] introduziu o Acoular, um *framework* em Python para aplicação de algoritmos de *beamforming* em arranjos de microfones. O autor destacou a relevância do imageamento acústico no desenvolvimento de equipamentos menos ruidosos, principalmente pela capacidade de identificar e analisar diferentes fontes de ruídos. O Acoular possui também a funcionalidade de simular sinais captados pelos microfones e gerar as imagens acústicas a partir destes.

A Nasa (*National Aeronautics and Space Administration*) possui um projeto denominado ISAAC (*Integrated System for Autonomous and Adaptive Caretaking*), no qual também foi desenvolvido um

simulador de câmeras acústicas disponível para o público em geral [14]. Nele é possível configurar, entre outras coisas, o movimento do robô (onde o arranjo está instalado) em relação às fontes, além dos sinais que estarão sendo reproduzidos.

Grythe [15] disponibilizou um simulador contendo fontes em posições fixas, porém com frequências variáveis, além de uma variedade grande de algoritmos para imageamento acústico. Algumas destas implementações de *beamformers* foram incorporadas ao presente trabalho, de modo a aumentar a variedade de testes realizáveis no AcousticCanvas.

Porém, nenhum dos simuladores citados possuem recursos para reproduzir situações em ambientes reverberantes. Embora o simulador do ISAAC possua configurações referentes às dimensões do ambiente simulado, este é considerado anecoico. Portanto, os simuladores descritos na literatura não são adequados para aplicação em estudos relacionados a ambientes internos.

Neste contexto, o presente artigo descreve o AcousticCanvas, um simulador de câmeras acústicas de código aberto¹, desenvolvido para simulações de ambientes internos com reverberação, tais como salas, auditórios, enfermarias e afins. A Seção 2 apresenta uma fundamentação teórica acerca do ISM (*Image-Source Method*), método utilizado na simulação da reverberação, e da técnica conhecida como *beamforming*. Em seguida, o simulador é apresentado com uma descrição do seu funcionamento e dos aspectos relacionados à sua utilização. Por fim, são apresentados os resultados e considerações finais, incluindo sugestões de trabalhos futuros.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção serão discutidos alguns tópicos teóricos relevantes para o entendimento do simulador AcousticCanvas.

2.1 Image-Source Method

Uma técnica fundamental para modelagem das características acústicas de um ambiente fechado é através da sua resposta ao impulso, denominada RIR (*Room Impulse Response*). A RIR consiste

¹Disponível no repositório <https://github.com/lasdi/acoustic-canvas>.

na caracterização da propagação sonora de um ponto a outro do ambiente, tanto através do caminho direto, quanto das reflexões nas paredes. Desta forma, simulações computacionais da acústica de ambientes reverberantes podem ser realizadas a partir de uma estimativa da RIR.

Neste contexto, Allen [16] propôs a utilização do método das imagens, referido como ISM (*Image-Source Method*), para estimativa da RIR em ambientes fechados. Este método parte da ideia de considerar os sinais de cada reflexão como provenientes de fontes posicionadas de forma espelhada em relação à parede, aplicando-se uma atenuação referente à absorção acústica do material. A Figura 1 mostra um exemplo considerando uma reflexão unidimensional. Observa-se que a distância percorrida pelo sinal é a mesma partindo de $-\tilde{x}_{s0}$ ou de x_{s0} , de modo que a atenuação provocada pelo ar é mesma. Ou seja, resta computar a atenuação pela absorção da parede, representada na figura como β_{x1} .

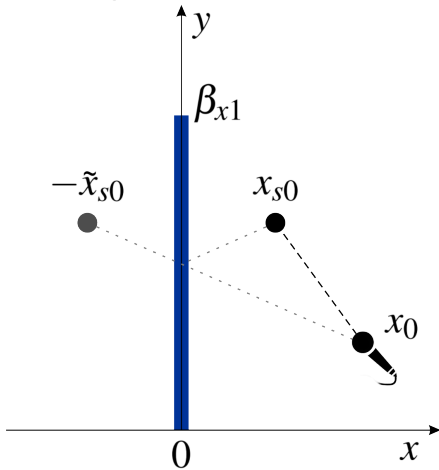


Figura 1: Exemplo da aplicação do ISM em uma dimensão.

Pode-se, então, definir um parâmetro capaz de acumular estas atenuações da seguinte forma:

$$\alpha_{\tilde{s}_k s_0} = \frac{\beta_{\tilde{s}_k s_0}}{4\pi|\mathbf{d}_{\tilde{s}_k s_0}|}, \quad (1)$$

onde $\alpha_{\tilde{s}_k s_0}$ é o coeficiente de atenuação equivalente da k -ésima imagem em relação ao caminho direto, $\beta_{\tilde{s}_k s_0}$ é o coeficiente de atenuação acumulado, e $\mathbf{d}_{\tilde{s}_k s_0}$ é a diferença da distância percorrida pelo som relativa ao caminho direto, de modo que $1/4\pi|\mathbf{d}_{\tilde{s}_k s_0}|$ mensura a atenuação decorrente do caminho percorrido.

Pode-se, então, escrever a RIR calculada pelo ISM como

$$h(t) = \sum_k \alpha_{\tilde{s}_k s_0} \delta(t - \tau_{\tilde{s}_k s_0}), \quad (2)$$

sendo $\tau_{\tilde{s}_k s_0}$ o atraso do sinal da k -ésima fonte relativo ao caminho direto.

No entanto, para implementação em tempo discreto do ISM é preciso realizar alguns ajustes na formulação descrita acima. O primeiro diz respeito à quantidade de fontes. A Equação 2 indica que se pode computar os efeitos de tantas fontes quanto desejado, de modo que é necessário estabelecer um critério que defina um limite. Uma técnica comum é utilizar como referência uma estimativa do RT_{60} , para calcular as ordens máximas de reflexão em cada eixo do sistema cartesiano. O RT_{60} (*Reverberation Time*) é tempo que as reflexões levam para sofrer atenuação de 60 dB, geralmente medido em ms. O RT_{60} é a métrica principal para avaliar a reverberação de um ambiente.

Uma estimativa do RT_{60} pode ser obtida utilizando a fórmula de Sabine modificada [17]:

$$T_{60} = \frac{55,3V}{c(A_{mat} + 4m_{ar}V)}, \quad (3)$$

na qual V é o volume do ambiente, c é a velocidade do som, m_{ar} é o coeficiente de absorção sonora do ar e A_{mat} é a absorção superficial total, calculada por:

$$A_{mat} = \sum_{i=1}^6 (1 - \beta_i^2) S_i, \quad (4)$$

sendo β_i o coeficiente de absorção e S_i a área da superfície, ambos referentes à i -ésima superfície. O coeficiente m_{ar} pode ser calculado por [18]:

$$m_{ar} = 5.5 \left(\frac{50}{H} \right) \left(\frac{f}{1000} \right)^{1.7} 10^{-4}, \quad (5)$$

na qual H é a umidade do ar e f é a frequência sonora.

De posse do valor do RT_{60} , a ordem de reflexão em relação ao eixo u , sendo $u \in \{x, y, z\}$, pode ser calculada por

$$N_u = \frac{cT_{60}}{2L_u}, \quad (6)$$



onde L_u é a dimensão do ambiente referente à dimensão u .

Outra modificação necessária para implementação de 2 em tempo discreto é a substituição da função $\delta(t)$, visto que sua definição é restrita para tempo real. Uma técnica vastamente documentada na literatura é utilizar um filtro passa-baixas ideal com janelamento Hanning, ou seja [18]:

$$\delta_{LPF}(t) = \frac{1}{2} \left(1 + \cos \left(\frac{2\pi t}{T_\omega} \right) \right) \text{sinc}(2\pi f_c t), \quad (7)$$

na qual $-\frac{T_\omega}{2} \leq t \leq \frac{T_\omega}{2}$, sendo T_ω a duração do filtro e f_c a frequência de corte. Tipicamente os valores escolhidos são 8 ms e a frequência de Nyquist, respectivamente.

2.2 Curva de decaimento da energia

Uma vez que a RIR for encontrada, podemos utilizá-la para produzir uma estimativa melhor do RT_{60} em comparação àquela informada no método de Sabine. Dessa forma, poderemos aprimorar a representação do ambiente reverberante e sua comparação com ambientes reais.

Um técnica amplamente utilizada na estimação do RT_{60} a partir da RIR é a EDC (*Energy Decay Curve*), proposta por Schroeder [19]. A EDC permite fazer uma aproximação linear utilizando o método dos mínimos quadrados para extrapolar o RT_{60} a partir dos parâmetros T_{30} (de -5 dB a -35 dB), T_{20} (de -5 dB a -25 dB) ou EDT (*Early Decay Time*, entre 0 dB e -10 dB), conforme descrito na ISO 3382-1 [20].

2.3 Imageamento acústico

As técnicas de imageamento acústico possibilitam a obtenção de características essenciais do campo sonoro, através da amostragem espacial e temporal realizada pelo arranjo de microfones, tais como a localização e medição da intensidade das fontes sonoras. A abordagem mais fundamental utilizada para este fim é o *Conventional Beamforming* (CBF) [6], por vezes referido também como *Delay-and-Sum* (DAS), ou *Bartlett Beamforming*. O termo *beamforming* refere-se um conjunto de algoritmos da área de processamento de sinais capazes de focar, ou direcionar, um arranjo de sensores para uma direção em particular sem a necessidade de alterá-lo fisicamente. A Figura 2

mostra uma imagem acústica incluindo a sobreposição a uma imagem ótica, em preto e branco.

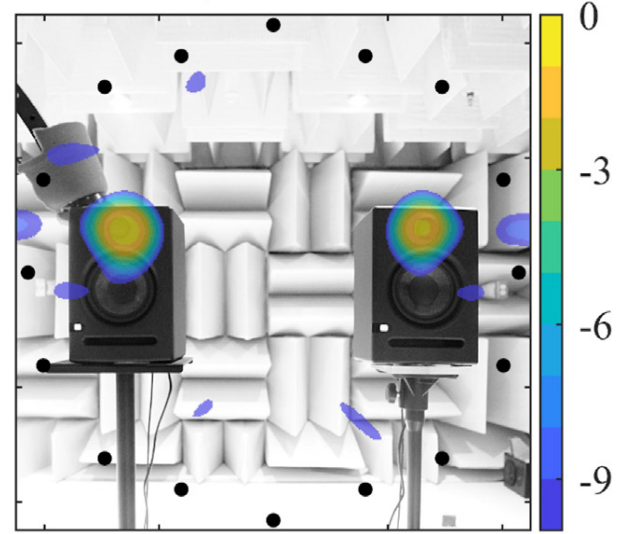


Figura 2: Imagem acústica obtida utilizando o *Conventional Beamformer*. Os alto-falantes estão reproduzindo ruído branco, posteriormente filtrados na banda de oitava centrada em 4 kHz. Os pontos pretos representam os microfones do arranjo (reproduzida de Padois et al. [1]).

Considerando um conjunto de M microfones, a ideia por trás do DAS é aplicar atrasos Δ_m nos sinais captados individualmente pelos sensores ($y_m(t)$) e somá-los, de modo que aqueles provenientes da direção de interesse (diretamente relacionada com os atrasos individuais) sofram interferência construtiva enquanto os demais sinais sofram uma interferência destrutiva, ainda que parcialmente, reduzindo assim as distorções no sinal resultante. Também pode-se aplicar pesos w_m aos sinais, o que consiste na técnica denominada apodização, de modo a melhorar a resposta espacial do arranjo, principalmente através da redução da amplitude dos lóbulos laterais do padrão de diretividade em um processo análogo ao janelamento. A Figura 3 mostra um diagrama ilustrando o processo do DAS.

Para aplicação de *beamformers* em imageamento acústico, define-se um plano de varredura no espaço, onde serão definidos os pontos focais. Desta forma, o *beamformer* será direcionado para estes pontos a fim de estimar a potência do campo sonoro proveniente destas direções. Quando a direção de determinado ponto corresponder à direção de uma fonte, a potência do sinal de saída do *beamformer* será máxima. É possível ainda interpolar as potências das direções dos pontos

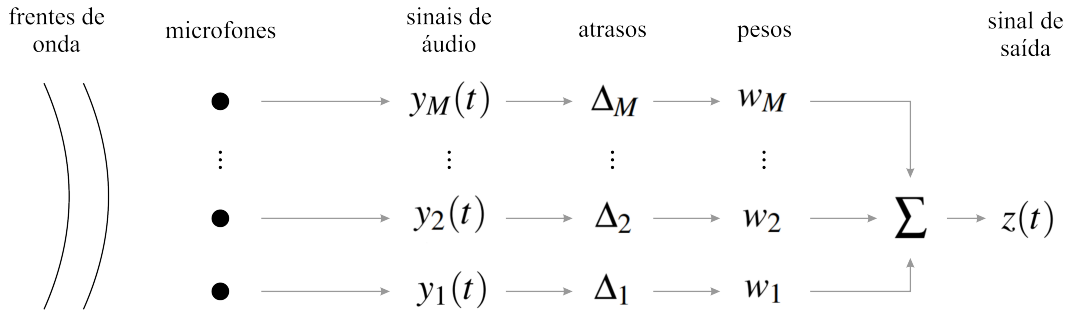


Figura 3: Diagrama do DAS.

focais, de modo a colorir a potência espacial (potência através do plano de varredura) e dar origem às imagens acústicas (ver Figura 2). A Figura 4 ilustra um exemplo de plano de varredura.

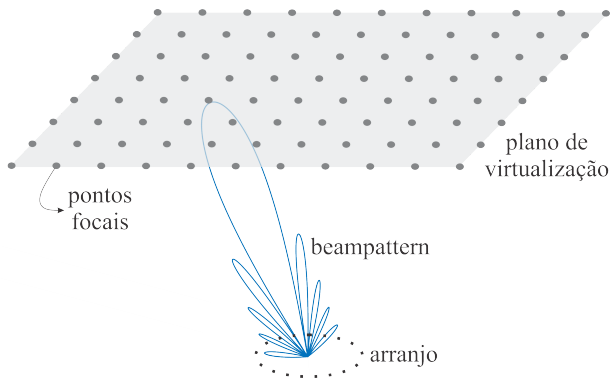


Figura 4: Ilustração do plano de virtualização.

3. ACOUSTICCANVAS

O simulador AcousticCanvas consiste em um Matlab App de código aberto, desenvolvido com o objetivo de realizar simulações de câmeras acústicas em ambientes reverberantes, tais com ambientes internos de residências, salas de aula, auditórios e afins. A utilização desta ferramenta contribui para análises de viabilidade de determinadas geometrias de arranjo em aplicações específicas, bem como no desenvolvimento de novos produtos para o setor de imageamento acústico. Foi desenvolvido objetivando:

- Possibilitar a utilização de arranjos de microfones com diferentes geometrias;
- Permitir a configuração fontes reproduzindo diferentes sinais;
- Suportar diferentes algoritmos de *beamforming*;
- Possibilitar a geração de sinais com reverberação;

- Permitir variar parâmetros do ambiente, a fim de controlar a reverberação;
- Possibilitar utilização de processamento paralelo.

O simulador possui dois subsistemas onde os principais processamentos são realizados, as *engine* do ISM e do *Beamforming*, conforme ilustrado no diagrama da Figura 5. O primeiro é responsável pela simulação dos sinais captados pelos microfones, tendo em vista as configurações do ambiente e das fontes. A função do segundo é gerar a imagem acústica simulada, a partir de um conjunto de algoritmos disponíveis e de uma variedade de configurações parametrizáveis pelo usuário, incluindo as referentes ao plano de virtualização. A seguir estes subsistemas serão descritos e relacionados com os campos editáveis, que podem ser identificados na tela do simulador mostrada na Figura 6.

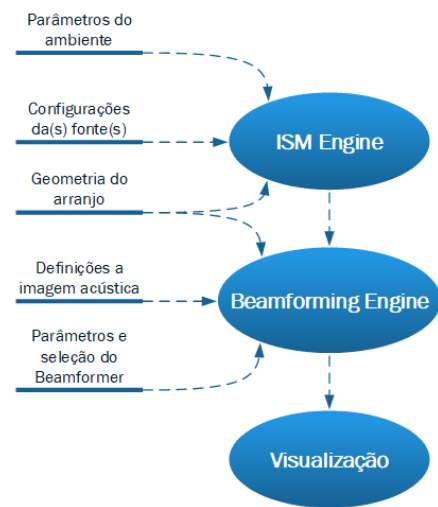


Figura 5: Diagrama do simulador AcousticCanvas.

3.1 Engine do Método Image-Source

Este subsistema processa as entradas do usuário referentes ao ambiente e configurações da fonte,

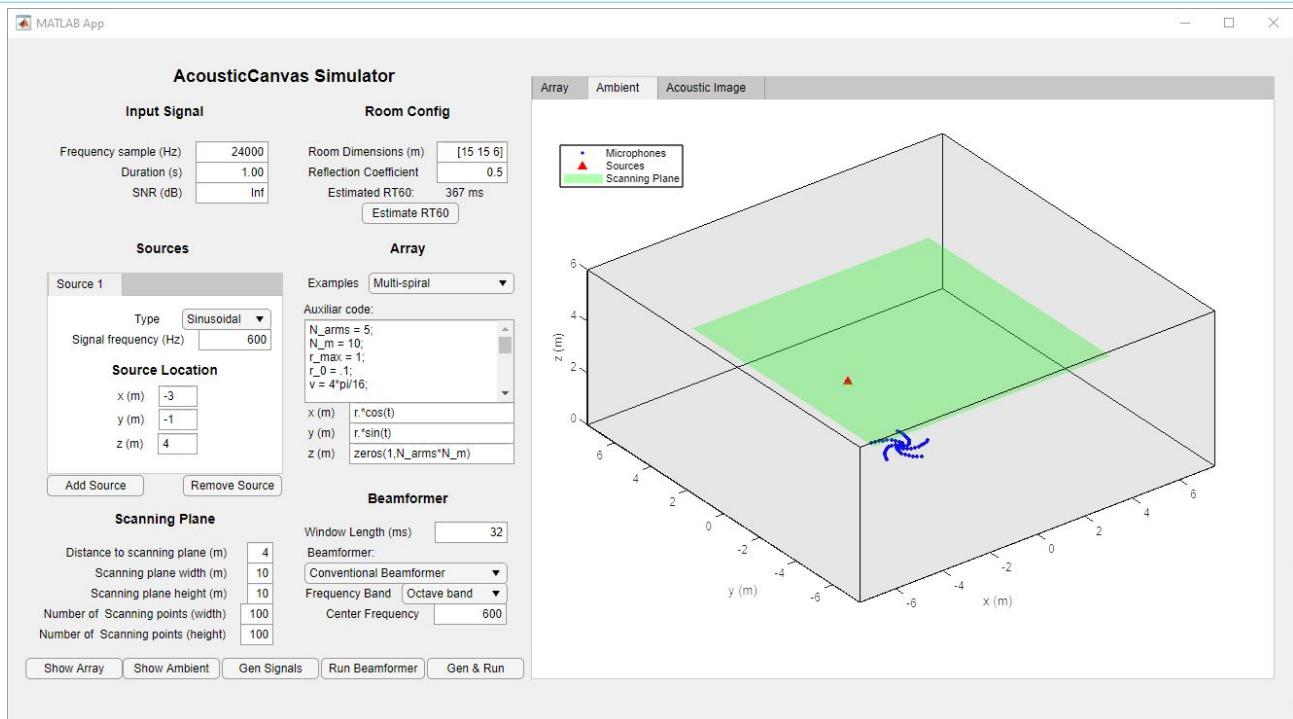


Figura 6: Tela do AcousticCanvas.

gerando como saídas os sinais dos microfones. O algoritmo utilizado é o ISM, conforme descrito na Seção 2.1. Na implementação foi utilizado o *Room Impulse Response Generator* [21], em conjunto com a interface MEX do Matlab para execução do seu *core* em C++. A *engine* do método *Image-source* executa as seguintes tarefas:

1. Leitura dos dados de entrada;
2. Geração das RIRs através do ISM;
3. Geração dos sinais originais das fontes, utilizando sinais de ruído branco gaussiano, sinais senoidais ou arquivos WAV informados pelo usuário;
4. Convolução entre as RIRs e os sinais originais das respectivas fontes;
5. Geração do sinal resultante de cada microfone através da soma das respostas individuais relativas a cada fonte e adicionando ruído branco descorrelacionado, de modo a atingir a SNR indicada pelo usuário.

Os campos do simulador relacionados à geração dos sinais serão descritos a seguir.

3.1.1 Configuração do ambiente

- *Room dimensions*: um vetor de três dimensões, em metros, indicando largura, compri-

mento e altura no ambiente;

- *Reflection Coefficient*: coeficiente de reflexão α das superfícies do ambiente, sendo $\alpha = 1 - \beta^2$;

Após a configuração dos parâmetros é possível estimar o RT₆₀ clicando no botão "Estimate RT60", utilizando o método da EDC, conforme descrito anteriormente.

3.1.2 Definições das fontes

Para a configuração das fontes, é importante o usuário estar ciente que a referência para o sistema de coordenadas é o centro da superfície inferior do ambiente. Os parâmetros são:

- *Frequency sample*: frequência de amostragem, em Hz;
- *Duration*: duração, em segundos, dos sinais gerados;
- *SNR*: a SNR, deve ser especificada em dB. Caso o usuário não queira inserir ruído, deverá utilizar a palavra "Inf";
- *Quantidade*: através dos botões "Remove Source" e "Add Source" é possível definir a quantidade de fontes. Cada nova fonte deverá ser configurada selecionando-se a aba correspondente;

- *Source Localization*: as coordenadas x , y , e z de cada fonte, em metros.
- *Type*: neste menu *drop down* é possível escolher entre três opções o tipo do sinal emitido por cada fonte, cada um requerendo um conjunto específico de parâmetros. Estão disponíveis:

Speech: para um sinal de fala, deve-se especificar o caminho do arquivo WAV, tendo-se como referência a pasta de trabalho atual;

Sinusoidal: para utilização de senoides é necessário apenas configurar a frequência em Hz;

WGN: para ruído branco (*White Gaussian Noise*) nenhum parâmetro adicional é requerido.

3.2 Engine de Beamforming

O subsistema responsável pela geração das imagens acústicas realiza todos os cálculos relacionados aos algoritmos de *beamforming*. A implementação do *Conventional Beamformer*, único disponibilizado para processamento de múltiplas frequências, foi realizada conforme descrito em [1], seguindo as seguintes etapas:

1. Cálculo da matriz de espectro cruzado, definindo a diagonal principal da matriz como vetores nulos, a fim de mitigar os impactos da autocorrelação dos ruídos;
2. Cálculo do vetor direcionador, através da formulação IV descrita em [22];
3. Aplicação do *Conventional Beamformer* para cada frequência de interesse;
4. Obtenção da resposta diretiva.

Já para os demais algoritmos de *beamforming*, foram utilizados os códigos disponibilizados em [15], os quais executam as seguintes tarefas:

1. Cálculo da matriz de espectro cruzado, referente à frequência de interesse;
2. Cálculo do vetor direcionador, utilizando o modelo de frente de onda plana;
3. Obtenção da resposta diretiva do algoritmo selecionado.

Após a geração da resposta diretiva, que consiste na potência do campo sonoro medida pelo *beamforming* para cada ponto focal, é realizada uma interpolação para melhorar a visualização da imagem acústica. Após a realização da plotagem, é possível ajustar a faixa dinâmica (equivalente à potência mínima a ser exibida), habilitar a exibição das fontes, do arranjo ou dos máximos locais, além de exportar nos formatos PNG ou PDF (vetorizado).

Os parâmetros configuráveis do simulador serão detalhados nas subseções a seguir.

3.2.1 Definições da câmera acústica

- *Distance to scanning plane*: distância perpendicular do plano de varredura para o centro do arranjo, em metros;
- *Scanning plane width*: largura do plano de varredura, em metros;
- *Scanning plane height*: altura do plano de varredura, em metros;
- *Number of Scanning points (width)*: número de pontos focais ao longo da largura do plano de varredura;
- *Number of Scanning points (height)*: número de pontos focais ao longo da altura do plano de varredura.

3.2.2 Geometria do arranjo

- x , y e z : coordenadas dos microfones em metros. Estes campos podem ser preenchidos tanto por vetores de valores reais quanto por um comando ou função do Matlab;
- *Auxiliar code*: este campo pode ser preenchido com um trecho de código auxiliar para a definição das coordenadas dos microfones.

O campo de código auxiliar pode ser utilizado para uma configuração parametrizável da geometria. Um exemplo de código auxiliar disponível no simulador é mostrado no Código 1, no qual um arranjo multi-espiral pode ser definido com base nos parâmetros N_{arms} , N_m , r_0 , r_{max} e v , sendo respectivamente o número de braços, número de microfones por braço, raio interior, raio máximo e o ângulo constante formado entre o raio e as retas tangentes ao espiral, conforme descrito em



[23].

Código 1: Geração de um arranjo multi-espiral parametrizável através do campo *Auxiliar code*.

```
N_m = 4;
r_max = .04;
r_0 = .01;
v = 4*pi/16;

l_max = (r_0*sqrt(1+cot(v)^2)/cot(v)) * (r_max/r_0-1);
ln = ((1:N_m)-1)/(N_m-1) * l_max;
r = []; t = [];
for m = 1:N_arms
    t_aux = log(1+cot(v)*ln/(r_0*sqrt(1+cot(v)^2)))/cot(v);
    r = [r, r_0*exp(cot(v)*t_aux)];
    t = [t, t_aux+(m-1)*2*pi/N_arms];
end
```

Neste exemplo, os campos x , y e z devem ser preenchidos respectivamente por “ $r.\cos(t)$ ”, “ $r.\sin(t)$ ” e “ $\text{zeros}(1, N_{\text{arms}} \cdot N_m)$ ”, conforme mostrado na Figura 6.

Feitas as configurações descritas até aqui, é possível visualizar o arranjo e o ambiente, além gerar os sinais nos botões “*Show Array*”, “*Show Ambient*” e “*Gen Signals*”, respectivamente.

3.2.3 Definições do beamformer

Com relação às configurações do *beamformer*, o usuário pode escolher qual algoritmo deseja utilizar, sendo exibidos então os campos de entrada dos parâmetros necessários:

- *Window Length*: duração da janela em ms;
- *Conventional Beamformer*: implementação do *Delay-and-Sum* para múltiplas frequências, sendo possível escolher entre as opções:
 - Octave-Band*: nesta deverá ser informada a frequência central da banda de oitava a ser processada pelo CBF;
 - All*: todas as frequências serão processadas, de 0 Hz a $f_s/2$.
- DAS: implementação do *Delay-and-Sum* para frequência única, sendo esta requerida no campo “*Frequency Bin*”;
- MV: *Minimum-Variance Beamformer*;
- FB: *Functional Beamformer*;
- CLEAN: *CLEAN Beamformer*;
- CLEAN-SC: *Clean based on Source Coherence*;

3.3 Aceleração com processamento paralelo

O Matlab possui uma ferramenta denominada *Parallel Computing Toolbox*, que disponibiliza um conjunto de funcionalidades para processamento paralelo. Entre elas está a execução de laços de repetição em paralelo, que divide a tarefa nos diferentes núcleos do processador a fim de acelerar a execução. Estes *loops* são executados através do comando `parfor()`, que possui a mesma sintaxe do `for()`, com algumas limitações, como a restrição referente à independência de cada iteração em relação à anterior.

Desta forma, algumas tarefas do simulador foram implementadas utilizando este artifício do processamento paralelo, sendo elas:

- Geração das RIRs;
- Geração dos sinais recebidos pelos microfones;
- Implementação do *Functional Beamformer*;
- Cálculo da matriz de espectro cruzado.

4. RESULTADOS

A fim de demonstrar os resultados obtidos com o AcousticCanvas, reproduzimos um cenário descrito na literatura e analisamos o efeito da reverberação na resolução de um arranjo de microfones. Estas duas análises serão descritas a seguir.

4.1 Arranjo em estrela

Em seu artigo, Le Courtois [24] mostra um exemplo de *beamforming* aplicado em um cenário contendo três fontes de mesma frequência e potência. O arranjo utilizado contém 41 microfones, com geometria em estrela, medindo 2,5x2,5 m.

Esta geometria pode ser selecionada no menu *drop-down* “*Examples*”, através da opção “*Star 2.5x2.5 m*”. A Tabela 1, do Apêndice A, mostra quais configurações devem ser realizadas para reprodução desta simulação. Após a realização das configurações, pode-se clicar no botão “*Show Ambient*” para visualizar em três dimensões o arranjo, o plano de virtualização e as fontes. O resultado desta plotagem está mostrado na Figura 7, na qual não são exibidas paredes porque a simulação é realizada sem reverberação.

O exemplo de *beamforming* dado por Le Cour-

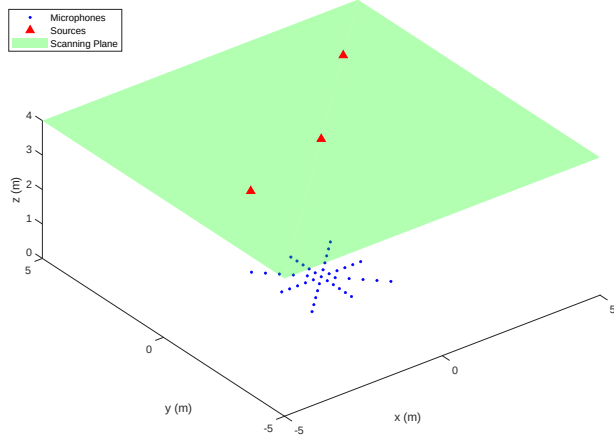


Figura 7: Ambiente da simulação do arranjo em estrela.

tois [24] está exibido na Figura 8a, enquanto a Figura 8b exibe o resultado obtido pelo AcousticCanvas. É possível observar a semelhança entre ambas, incluindo as distorções das fontes não localizadas na direção do centro do arranjo, fazendo-as possuir uma forma oval na imagem acústica.

4.2 Efeitos da reverberação

Um estudo do efeito da reverberação na resolução de um arranjo também foi realizado a fim de demonstrar funcionalidades do AcousticCanvas. O objetivo deste estudo é avaliar um cenário no qual a reverberação prejudica os resultados da câmera acústica, mais especificamente com relação à sua resolução, ou seja, a capacidade de distinguir fontes sonoras.

O ambiente simulado consiste em um escritório com reverberação típica, cujo RT_{60} é igual à 280 ms, caracterizando-o como factível em situações reais. O arranjo escolhido foi um circular com 20 cm de raio, contendo 16 microfones e SNR de 15 dB. As configurações do simulador para reproduzir este cenário estão detalhadas na Tabela 1 do Apêndice A. A Figura 9 ilustra o ambiente, sendo possível identificar o plano de varredura, o arranjo e as duas fontes, distantes 1,5 m.

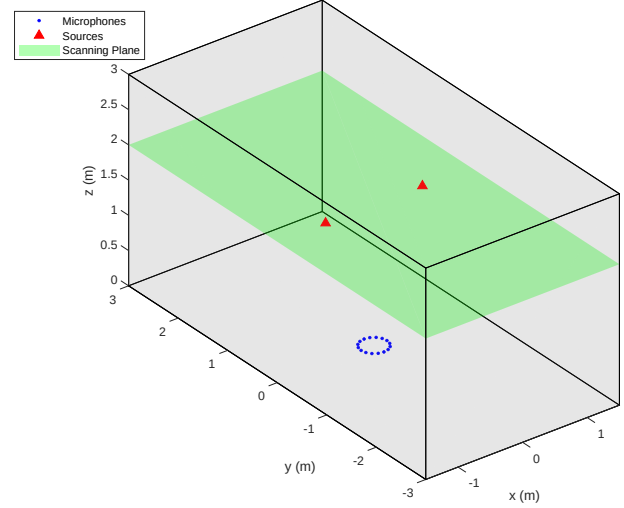


Figura 9: Ambiente da simulação 2.

Inicialmente foi realizada uma simulação sem reverberação, cuja imagem acústica resultante é mostrada na Figura 10. Pode-se observar que os pontos de máximo locais, representados pelos círculos verdes, coincidem com as localizações das fontes, indicando que o arranjo utilizado é capaz de separar as fontes neste cenário.

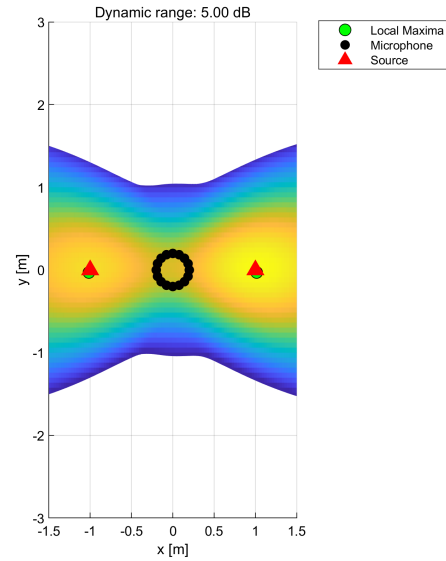


Figura 10: Imagem acústica sem reverberação.

Em seguida, o “*Reflection Coefficient*” foi alterado para 0.8, gerando um tempo de reverberação de 280 ms, enquanto todos os outros parâmetros foram mantidos constantes. O resultado, mostrado na Figura 11, demonstra que o arranjo não foi capaz de distinguir as fontes, sendo exibido então um único ponto de máximo a aproximadamente 0,5 m da fonte mais próxima.

Portanto, esta análise demonstra que os efeitos da reverberação devem ser levados em conside-

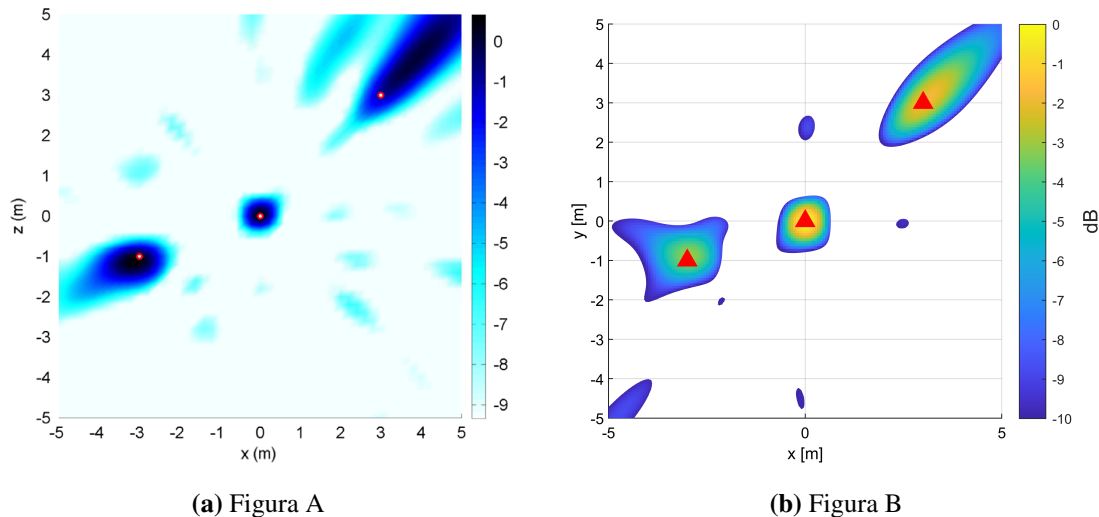


Figura 8: Resultado do *beamforming* obtido por Le Courtois [24] (a) e pelo AcousticCanvas (b).

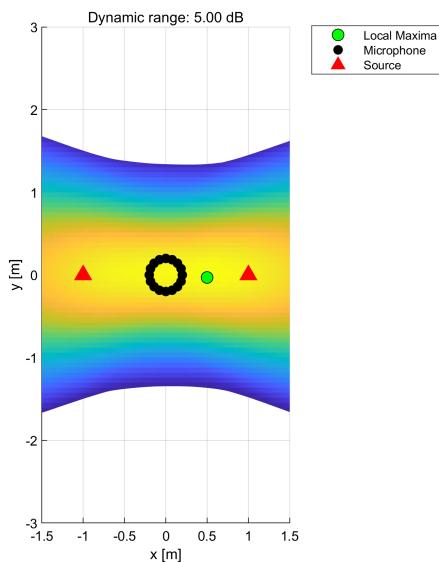


Figura 11: Imagem acústica com reverberação.

ração em projetos desenvolvidos para aplicações de imageamento acústico em ambientes internos. As simulações produzidas pelo AcousticCanvas são capazes de contribuir para obtenção dos resultados desejados nestes projetos para ambientes reverberantes.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O simulador AcousticCanvas possui inúmeras configurações parametrizáveis, de modo que o usuário é capaz de avaliar o arranjo de microfones desejado em diversos cenários, variando desde as características do ambiente que influenciam na reverberação, até os atributos das fontes sonoras. A variedade de *beamformers* incorporados ao simulador, permite também avaliar diferentes estratégias de projeto de câmeras acústicas. A

construção modular permite que novos *beamformers* sejam incluídos, enriquecendo ainda mais as avaliações realizadas por meio do AcousticCanvas. A interface gráfica e a inserção de dados por código-fonte conferem facilidade de uso e flexibilidade ao simulador proposto. Como possíveis trabalhos futuros, podemos citar a inserção de mais *beamformers* que operem em múltiplas frequências, a aceleração via GPU e sistemas de recomendação de arranjos.

6. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) e do Instituto Serrapilheira (apoio nº Serra – 1912-32159).

REFERÊNCIAS

- [1] Padois, Thomas; Fischer, Jeoffrey; Doolan, Con e Doutres, Olivier. Acoustic imaging with conventional frequency domain beamforming and generalized cross correlation: a comparison study. *Applied Acoustics*, 177:107914, 2021.
- [2] Fiebig, Wiesław e Dąbrowski, Damian. Use of acoustic camera for noise sources localization and noise reduction in the industrial plant. *Archives of Acoustics*, págs. 111–117, 2020.
- [3] Chiariotti, Paolo; Martarelli, Milena e Castellini, Paolo. Acoustic beamforming for noise source localization—reviews, methodology and applications. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 120:422–448, 2019.
- [4] Fedorko, Gabriel; Liptai, Pavol e Molnár, Vierošlav. Proposal of the methodology for noise sources identification and analysis of continuous transport systems

- using an acoustic camera. *Engineering Failure Analysis*, 83:30–46, 2018.
- [5] Pavlikova, L'udmila; Hricová, Beata e Lumnitzer, Ervín. Acoustic camera as a tool for identifying machinery and equipment failures. *Advances in Science and Technology. Research Journal*, 12(1), 2018.
- [6] Merino-Martínez, Roberto; Sijtsma, Pieter; Snellen, Mirjam; Ahlefeldt, Thomas; Antoni, Jerome; Bahr, Christopher J; Blacodon, Daniel; Ernst, Daniel; Finez, Arthur; Funke, Stefan *et al.* A review of acoustic imaging methods using phased microphone arrays. *CEAS Aeronautical Journal*, 10(1):197–230, 2019.
- [7] Park, Munhum e Rafaely, Boaz. Sound-field analysis by plane-wave decomposition using spherical microphone array. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 118(5):3094–3103, 2005.
- [8] Dougherty, Robert P; Fonseca, William D'Andrea e Gerges, Samir NY. Beamforming in reflecting environments: An experiment in a reverberation chamber. *Em Noise Control and Acoustics Division Conference*, volume 48396, págs. 43–51, 2008.
- [9] Fischer, J e Doolan, Con. Improving acoustic beamforming maps in a reverberant environment by modifying the cross-correlation matrix. *Journal of Sound and Vibration*, 411:129–147, 2017.
- [10] Li, Zhibao e Yiu, Ka-Fai Cedric. Beamformer configuration design in reverberant environments. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 47: 81–87, 2016.
- [11] Kwak, Seungchul; Ji, Yonghoon; Yamashita, Atsushi e Asama, Hajime. Development of acoustic camera-imaging simulator based on novel model. *Em 2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, págs. 1719–1724. *IEEE*, 2015.
- [12] Mai, Ngoc Trung; Ji, Yonghoon; Woo, Hanwool; Tamura, Yusuke; Yamashita, Atsushi e Asama, Hajime. Acoustic image simulator based on active sonar model in underwater environment. *Em 2018 15th International Conference on Ubiquitous Robots (UR)*, págs. 775–780. *IEEE*, 2018.
- [13] Sarradj, Ennes e Herold, Gert. A python framework for microphone array data processing. *Applied Acoustics*, 116:50–58, 2017.
- [14] Smith, Trey. Integrated system for autonomous and adaptive caretaking (isaac)- nasa. Disponível em: https://nasa.github.io/isaac/html/acoustics_camera.html. (acesso em: 08.01.2022).
- [15] Grythe, Jorgen. Beamforming repository. Disponível em: <https://github.com/jorgengrythe/beamforming>. (acesso em: 04.02.2022).
- [16] Allen, Jont B e Berkley, David A. Image method for efficiently simulating small-room acoustics. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 65(4): 943–950, 1979.
- [17] Kinsler, Lawrence E; Frey, Austin R; Coppens, Alan B e Sanders, James V. Fundamentals of acoustics. *John wiley & sons*, 2000.
- [18] Fu, Zhong-hua e Li, Jian-wei. Gpu-based image method for room impulse response calculation. *Multimedia Tools and Applications*, 75(9):5205–5221, 2016.
- [19] Schroeder, Manfred R. New method of measuring reverberation time. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 37(6):1187–1188, 1965.
- [20] ISO, EN e STANDARD, BRITISH. Acoustics—measurement of room acoustic parameters. 2008.
- [21] Habets, Emanuel. Room impulse response generator. Disponível em: <https://www.audiolabs-erlangen.de/fau/professor/habets/software/rir-generator>. (acesso em: 30.04.2022).
- [22] Sarradj, Ennes. Three-dimensional acoustic source mapping with different beamforming steering vector formulations. *Advances in Acoustics and Vibration*, 2012, 2012.
- [23] Underbrink, James R. Aeroacoustic phased array testing in low speed wind tunnels. *Em Aeroacoustic measurements*, págs. 98–217. *Springer*, 2002.
- [24] Le Courtois, Florent; Thomas, Jean-Hugh; Poisson, Franck e Pascal, Jean-Claude. Genetic optimisation of a plane array geometry for beamforming. application to source localisation in a high speed train. *Journal of Sound and Vibration*, 371:78–93, 2016.



A. PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO DOS EXEMPLOS MOSTRADOS

A Tabela 1 mostra as configurações do AcousticCanvas necessárias para reprodução dos resultados apresentados neste artigo.

Tabela 1: Parâmetros para simulações do exemplos.

Atributo	Le Courtois	Exemplo 2
<i>Sources types</i>	sinusoidal	WGN
<i>Sources frequency</i>	600	Não se aplica
<i>Source 1 Location</i>	[-3,-1,4]	[0.75, 0, 2]
<i>Source 2 Location</i>	[0,0,4]	[-0.75, 0, 2]
<i>Source 3 Location</i>	[3,3,4]	Não se aplica
<i>Scanning plane width</i>	10	3
<i>Scanning plane height</i>	10	6
<i>Distance to scanning plane</i>	4	2
<i>Refflection Coefficient</i>	0	{0,0.8}
<i>Room Dimensios</i>	Não se aplica	[3, 6, 3]
SNR	Inf	15 dB
<i>Examples</i>	2,5x2,5 mm	Circular
<i>Beamformer</i>	CBF	CBF
<i>Frequency Band</i>	Octave band	Octave band
<i>Center Frequency</i>	600	800