

FIA 2020/22

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

Florianópolis, SC, Brasil

Desenvolvimento de um escâner automatizado para medição sequencial de respostas ao impulso

Souza, G. A.^{1,2}; Fonseca, W. D'A.¹; Brandão, E.^{1,2}

¹ Engenharia Acústica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil, {eric.brandao, will.fonseca}@eac.ufsm.br

² Programa de pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria RS, Brasil, gabriel.azzuz@eac.ufsm.br

Resumo

Este artigo apresenta o desenvolvimento de um escâner automatizado para a tomada sequencial de medições de resposta ao impulso. O sistema usa o mesmo tipo de tecnologia de impressoras 3D, com uma base que move um sensor acústico nos eixos x , y e z . A movimentação do sensor é feita por motores de passo, controlados por um processador Arduino. Assim, um conjunto de $\mathcal{M}$ respostas ao impulso são medidas sequencialmente com o arranjo configurado. Com as $\mathcal{M}$ respostas ao impulso coletadas, é possível mapear a informação espacial do campo sonoro em uma série de $\mathcal{L}$ ondas planas, utilizando a solução de um problema inverso com regularização de Tikhonov. O sistema desenvolvido é flexível, de forma que diversos experimentos podem ser executados com precisão. Como demonstração, a bancada é utilizada na medição *in situ* da impedância acústica. De posse das amplitudes complexas das $\mathcal{L}$ ondas planas, pode-se reconstruir o campo acústico nas imediações do arranjo utilizado, o que permite a reconstrução da impedância de superfície do material sob teste.

Palavras-chave: medição de impedância, escaneamento do campo acústico, arranjo de microfones, decomposição em ondas planas.

PACS: 43.55.Ev, 43.60.Fg, 43.60.Jn.

Development of an automated scanner for the sequential measurement of impulse responses

Abstract

This paper presents the development of an automated scanner for measuring sequential impulsive responses. The system uses the same type of technology as 3D printers, with a base that moves an acoustic sensor along the x , y , and z -axis. The sensor displacement is accomplished with stepper motors, controlled by an Arduino processor. Thus, a set of $\mathcal{M}$ impulse responses are measured sequentially with a configured array. With the $\mathcal{M}$ impulsive responses collected, it is possible to map the spatial information in the sound field to a set of $\mathcal{L}$ plane waves by solving the inverse problem with Tikhonov regularization. The built system is flexible, and different experiments can be executed accurately. This study focus on the *in situ* impedance measurement. Once one computes the complex amplitudes of the $\mathcal{L}$ plane waves, the sound field in the vicinity of the array can be reconstructed, which allows the estimation of the surface impedance of a sound absorber.

Keywords: impedance measurement; sound field scanning; array of microphones; plane-wave decomposition.



1. INTRODUÇÃO

A caracterização espaço-temporal de cenários acústicos é um tema fundamental na acústica técnica. Tal necessidade se origina no fato de que a equação da onda sonora implica que o campo acústico tem variações temporais e espaciais [1]. As variações temporais de um determinado ponto no espaço podem ser obtidas a partir da medição do campo sonoro com um microfone. Para medir as variações espaciais é necessário tomar medições em uma série de pontos no espaço (i.e., usando um arranjo de microfones). O uso de múltiplos pontos de medição tem inúmeras aplicações em acústica, sendo que uma série de técnicas e algoritmos existem para a caracterização de cenários acústicos. Em geral, pode-se classificar a caracterização espaço-temporal em: (i) técnicas de *beamforming* [2–4], que são utilizadas para identificar fontes sonoras afastadas do arranjo de microfones; e (ii) técnicas de *holografia do campo próximo* (ou *Nearfield Acoustical Holography*, NAH) [5], utilizadas para analisar o comportamento do campo acústico próximo a uma fonte sonora (ou elemento difrator).

Os métodos baseados em NAH, que são o foco deste trabalho, têm diversas aplicações como: a caracterização da radiação sonora de fontes [6–8]; a medição da resposta espacial em acústica de salas [9–11]; a caracterização *in situ* de absorvedores [12–16]; e a caracterização de fenômenos de difração em amostras finitas e/ou irregulares [17–19]. Diversos tipos de processamentos matemáticos existem para essas aplicações. Neste trabalho, as gravações de diversos microfones no domínio espacial serão mapeadas para o domínio do número de onda [9].

Maynard *et al.* [5] aponta que as técnicas de NAH têm muito potencial, pois são capazes de extrapolar as medições e calcular dados como: pressão, velocidade de partícula e intensidade sonora no campo próximo de uma fonte ou aparato. No entanto, o ensaio pode ter alto custo, visto o número aumentado de microfones necessários para montar um arranjo. Por exemplo, as análises holográficas investigadas por Hald *et al.* [16] utilizaram um arranjo com 128 microfones. Considerando que o custo de microfones (capacitivos) de medição de alta precisão e exatidão é elevado, o custo total de um arranjo pode se tornar inviável.

Uma possível solução, que contorna esse problema, consiste em utilizar um braço robótico que varre os pontos do arranjo de microfones sequencialmente [15]. Neste caso, o método necessita apenas de um microfone, e tem a vantagem de eliminar os problemas de diferença relativa entre os diversos microfones de um arranjo.

Este trabalho apresenta uma aplicação e o desenvolvimento de um protótipo de custo reduzido, capaz de varrer o espaço com um microfone e tomar medidas do campo acústico de maneira sequencial. O projeto do protótipo foi concebido considerando alguns detalhes funcionais importantes, como a precisão do deslocamento e que este seja feito de maneira silenciosa. O artigo é estruturado da seguinte forma: na Seção 2 apresenta-se a estrutura básica do sistema projetado, a eletrônica necessária e o sistema de controle por *software*. Na Seção 3 apresentam-se o processamento de sinais usados no trabalho e a formulação matemática aplicada na decomposição da informação espacial em uma série de ondas planas. Na Seção 4 apresentam-se os resultados obtidos da medição de um material poroso.

2. DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA

O escâner desenvolvido neste trabalho usa o mesmo tipo de tecnologia de impressoras 3D e CNC *routers*. Tais equipamentos possuem uma estrutura de peças e perfis de alumínio do tipo *V-slot*, pertencentes a um grupo de ferramentas denominada *Openbuilds*. No escâner desenvolvido, uma base move um sensor acústico nos eixos *x*, *y* e *z* — o projeto final do sistema é mostrado na Figura 1.

2.1 Estrutura

Cada peça utilizada foi dimensionada na fase de modelagem 3D do projeto. As peças foram unidas para montar quatro atuadores lineares, que são dispositivos que movem uma carga em linha reta (vide Figura 2). Dois atuadores idênticos (A1 e A2) operam em conjunto para mover a base da Figura 1 no eixo *x*. O terceiro atuador (A3), movido pelos dois primeiros, é responsável por mover a base no eixo *y*. O quarto atuador (A4) completa a movimentação no eixo *z*. Dessa maneira, é possível movimentar a haste que contém o microfone com três graus de liberdade. O escâner é totalmente desmontável e quatro rodízios giratórios

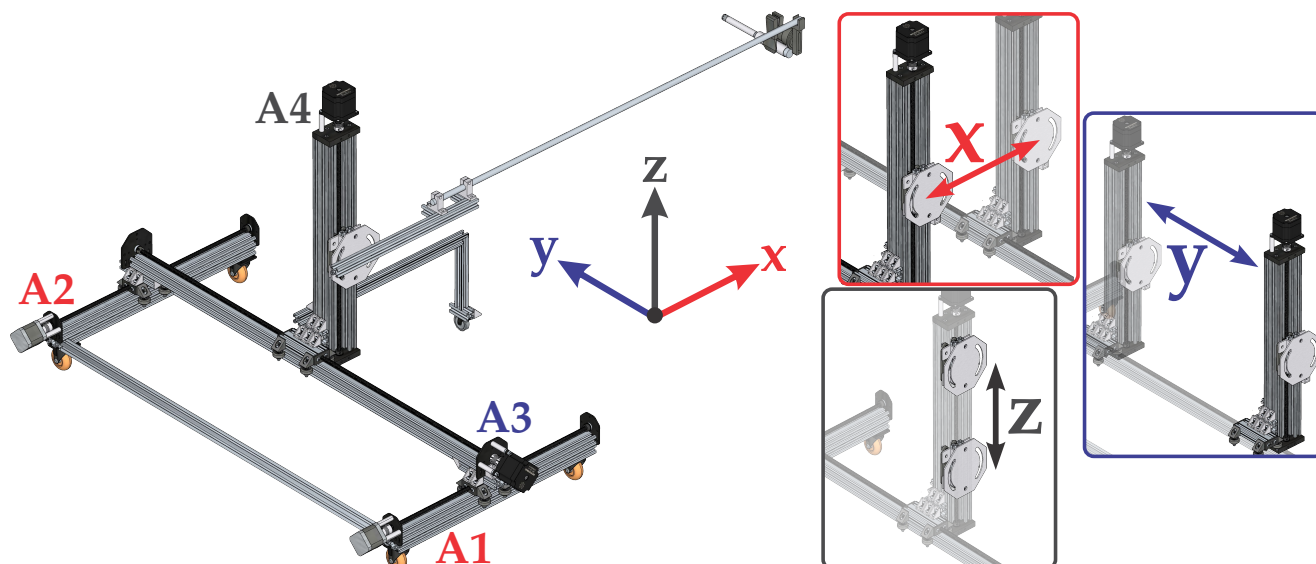


Figura 1: Projeto final de escâner (esquerda) e o esquema de deslocamento nos três eixos.

permitem movê-lo de posição se necessário.

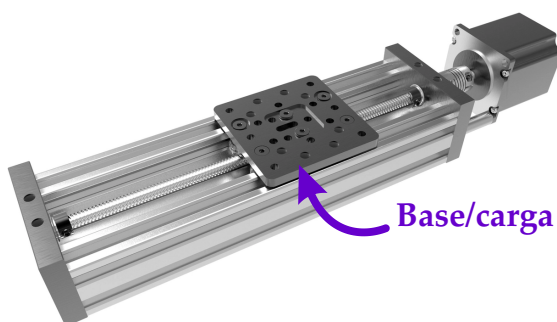


Figura 2: Atuador linear.

A precisão da posição do microfone depende da estabilidade mecânica desse sistema formado pelos atuadores lineares interligados. Sendo assim, é importante salientar que a carga de cada atuador consiste num guia metálico com pequenos rodízios que se encaixam perfeitamente no sulco do perfil, o que impede movimentos de torção que o peso da haste com o microfone poderia gerar. O suporte em “L” (com rodízio), fixado no Atuador A4, foi adicionado para minimizar a torção em torno do eixo y . O microfone será deslocado corretamente pelos eixos x , y e z desde que o último Atuador A4 esteja perpendicular ao piso do ambiente. Isso pode ser verificado, por exemplo, com uma ferramenta de medição de nível todas as vezes antes de utilizar o escâner.

O comprimento dos atuadores limita o deslocamento nos eixos x , y e z , de maneira que o maior volume espacial possível de ser escaneado é de $0,48_{(x)} \times 1,10_{(y)} \times 0,45_{(z)} \text{ m}^3$.

2.2 Sistema eletrônico

O diagrama de conexões do sistema eletrônico do escâner está apresentado na Figura 3. A carga de um atuador linear é rosqueada em um fuso trapezoidal, que está acoplada a um *motor de passo* (ver Figura 2). Este tipo de motor geralmente emite um baixo ruído em alta frequência. Os Atuadores 1 e 2 (eixo x) utilizam o motor NEMA 17¹ com 4,2 N cm de torque. Já os Atuadores 3 e 4 (eixos y e z) utilizam o motor NEMA 23 com 12,6 N cm de torque. Todos os quatro motores de passo do escâner possuem a resolução padrão de 1,8°/passo, o que faz uma rotação completa equivaler a 200 passos. Ao rotacionar 200 passos, a carga do atuador é linearmente deslocada por 0,8 cm.

Motores de passo são energizados por um *driver* de movimento, que também é responsável pela resolução de rotação. O escâner utiliza três *drivers* que fornecem um valor específico de corrente elétrica em função da posição das três primeiras chaves DIP² localizadas na lateral de cada *driver*. O par de motores NEMA 17 exige 3,4 A

¹NEMA significa National Electrical Manufacturers Association, é a maior associação comercial de fabricantes de equipamentos elétricos dos EUA. Ela define padrões a serem utilizados na indústria, incluindo motores de passo (*step motors*). O número associado, como em NEMA 17, significa que a sua tampa frontal (*frame*) tem uma aresta de 1,7 polegadas ($\approx 42 \text{ mm}$), logo, NEMA 23 tem 2,3” ($\approx 57 \text{ mm}$).

²Dual In-line Package (ou pacote duplo em linha) são interruptores encapsulados de dois estados on/off.

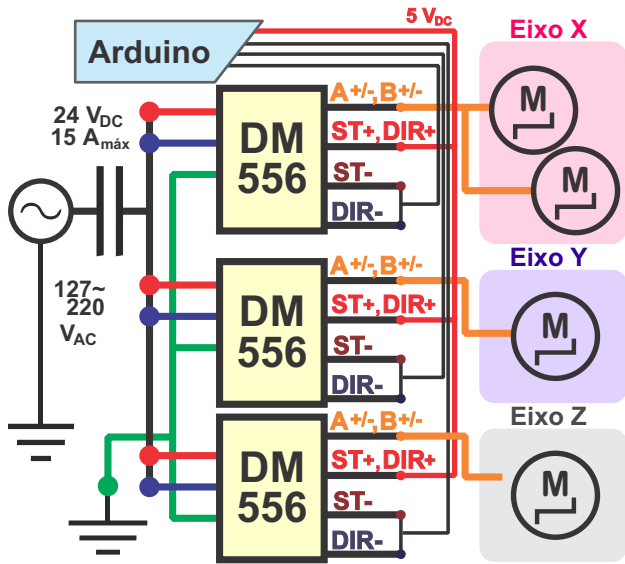


Figura 3: Conexões do sistema eletrônico do escâner.

($2 \times 1,7$ A) de corrente elétrica, e cada um dos motores NEMA 23 consomem uma corrente de 2,8 A. A quarta chave DIP é mantida na posição off, o que faz o *driver* fornecer metade da corrente configurada quando o motor estiver parado, evitando assim superaquecimento dos motores.

Os três *drivers* recebem pulsos elétricos de uma placa Arduino pela entrada PUL-, sendo que um pulso equivale a um passo de rotação. No entanto, as últimas quatro chaves DIP (5–8) do *driver* configuram a resolução do motor, fazendo que o pulso represente um micro-passo, e a posição dessas chaves indicam quantos micro-passos equivalem a uma rotação completa. Os três *drivers* do escâner trabalham com a resolução de 1.600 micro-passos por revolução.

2.3 Funcionamento

Em um ensaio no qual se pretende medir a absorção sonora *in situ* de um material, o escâner é posicionado de maneira que o microfone fique centralizado sobre a superfície do material, como mostra a Figura 4. A altura do microfone em relação à superfície do material é medida com um paquímetro. Este ponto referencial é denominado $\mathbf{r}_0 = (0, 0, z_0)$.

A partir de $\mathbf{r}_0$ o escâner começa a varredura dos pontos $\{\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_m\}$ que formam um arranjo pré-configurado. Considere a situação apresentada pela Figura 5, na qual os pontos representam posições de um microfone, que é deslocado do ponto $\mathbf{r}_n$ ao ponto $\mathbf{r}_{n+1}$ pelo escâner. O desloca-

mento d equivale à distância euclidiana entre $\mathbf{r}_n$ e $\mathbf{r}_{n+1}$. O escâner é capaz de mover o microfone por um eixo de cada vez. Sendo assim, ele deslocará por $d_{\hat{x}}$, $d_{\hat{y}}$ e $d_{\hat{z}}$ para chegar ao ponto $\mathbf{r}_{n+1}$. Matematicamente tem-se:

$$d: \mathbf{r}_n \rightarrow \mathbf{r}_{n+1} \begin{cases} d_{\hat{x}} = (r_{(n+1)} - r_n) \cdot \hat{x} \\ d_{\hat{y}} = (r_{(n+1)} - r_n) \cdot \hat{y} \\ d_{\hat{z}} = (r_{(n+1)} - r_n) \cdot \hat{z} \end{cases} \quad (1)$$

As coordenadas dos receptores são dadas em metros. Sabendo que uma rotação dos motores utilizados é completada após 1.600 micro-passos, o que equivale a um deslocamento linear de 0,8 cm, o número de micro-passos em função da distância, $N(d)$, é dado por

$$N_d = \frac{d \times 1.600}{0,008}, \quad \text{com } N_d \in \mathbb{Z}. \quad (2)$$

A execução de um micro-passo é conseguida por meio da aplicação de um pulso elétrico, que é gerado pelo Arduino e amplificado pelo *driver*. Assim, deve haver $N_d \in \mathbb{Z}$ pulsos para movimentar um dado eixo em uma dada distância. Valores não inteiros do resultado da Equação (2) são arredondados pelo algoritmo de controle. O erro gerado pelo arredondamento equivale à diferença entre o valor real e o aproximado de N_d , ou seja,

$$e_{N_d} = \left| N_d^{(\mathbb{R})} - N_d^{(\mathbb{Z})} \right| \text{ micro-passo}. \quad (3)$$

Desta maneira, o erro máximo é de 0,5 micro-passo que, para a resolução selecionada, equivale a 5 μm de erro no deslocamento linear, o que é tolerável.

2.3.1 Software, hardware e infraestrutura

Toda a programação de *software* envolvida no controle do escâner foi desenvolvida em Python — ainda, existe uma parte de Arduino Code dedicada aos motores. Foram criadas funções que facilitam o uso simultâneo de duas interfaces de programação. A conexão com a placa Arduino é feita por meio da interface Telemetry, ao mesmo tempo que o sistema de geração e gravação dos sinais sonoros é utilizado por meio da interface de aquisição NIDAQmx. Os repositórios desenvolvidos são públicos e estão disponíveis no GitHub [20, 21].

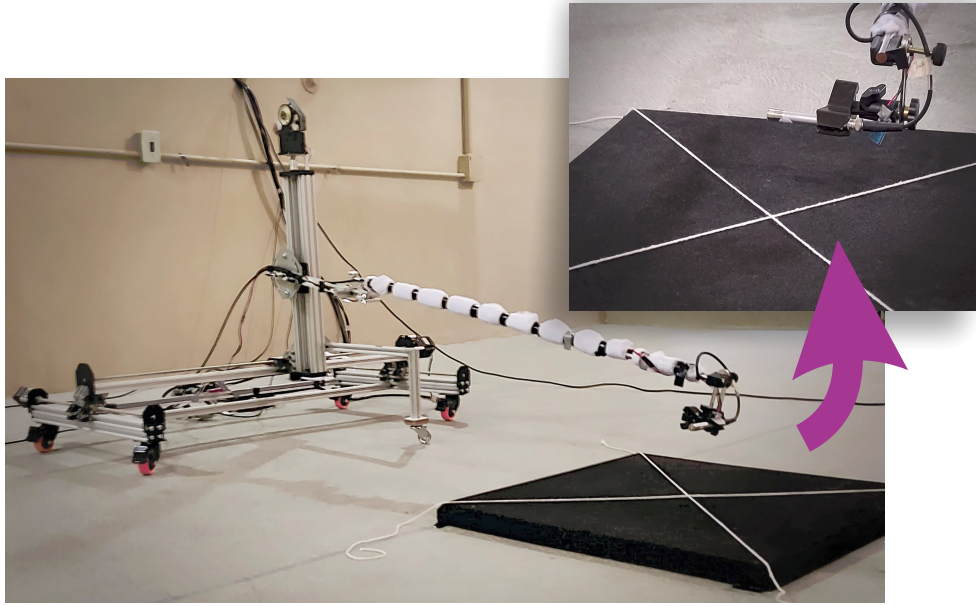


Figura 4: Microfone centralizado ao material, sua localização é dada por $\mathbf{r}_0$ (câmara reverberante de 200 m³ da UFSM).

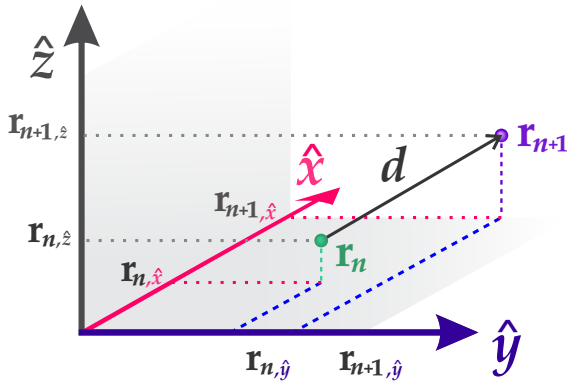


Figura 5: Cenário hipotético no qual o escâner desloca um microfone do ponto $\mathbf{r}_n$ ao ponto $\mathbf{r}_{n+1}$.

Os ensaios que produziram os resultados apresentados na Seção 4 foram realizados dentro da câmara reverberante de 200 m³ da UFSM. Para captação da pressão sonora utilizou-se o microfone B&K 4942 (de campo difuso), que é conectado ao módulo de aquisição NI 9234. O sinal de excitação é produzido com o módulo de geração NI 9263, passa pelo amplificador B&K 2718 e alimenta uma pequena caixa acústica esférica (diâmetro de 10,1 cm), que possui um alto-falante de cerca de 3 polegadas [22]. Para o uso simultâneo dos módulos NI em apenas uma porta USB, o chassi NI-DAQ 2174 é utilizado.

Confeccionou-se um tripé de alumínio com uma longa haste que posiciona a fonte sonora a uma altura $h \leq 150$ cm do centro de um material colocado sobre o piso da câmara reverberante (veja a Figura 4). Depois de posicionar o escâner para centralizar a membrana do microfone com res-

peito ao centro do material, pode-se então iniciar o ensaio. O procedimento pode ser dividido em duas fases: configuração e medição. O fluxograma na Figura 6 apresenta a lógica do algoritmo da primeira fase.

A Figura 6 mostra que o algoritmo é iniciado a partir dos parâmetros de configuração organizados nas variáveis do tipo `.dict`, que possuem o formato tal como apresentado pelo Código 1. O opção de testar o sistema de medição é útil para ajustar a faixa dinâmica da medição, alterando a potência no amplificador.

Código 1: Arquivo dict para configuração da placa Arduino.

```
Ard = {'step_pins': [[2,24], # eixo X
                    [3,26], # eixo Y
                    [4,28]], # eixo Z
       'dht_pin': 40 # sensor T e u }
```

A lógica do algoritmo durante a segunda fase do ensaio está demonstrada no fluxograma da Figura 7. Ele mostra que a mudança da posição do microfone, assim como a execução e gravação dos sinais sonoros, ocorrem dentro de um *loop*. A variável N corresponde ao número total de pontos, enquanto d é uma matriz $N \times 3$ com cada linha contendo as 3 distâncias que devem ser percorridas por cada eixo para atingir o próximo ponto. O *loop* começa em $i = 1$, assim, $d(i, 1)$, $d(i, 2)$ e $d(i, 3)$ são as distâncias que levam o microfone do ponto $\mathbf{r}_{i-1}$, que corresponde

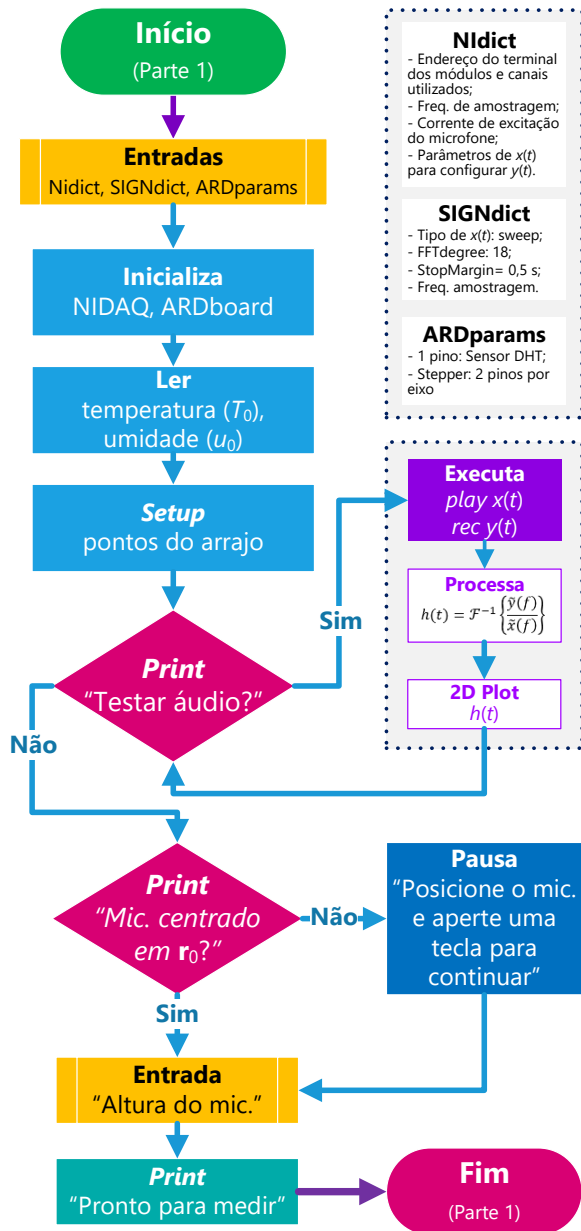


Figura 6: Fluxograma da lógica da primeira fase do ensaio com o escâner.

à posição inicial $\mathbf{r}_0^3$, ao ponto $\mathbf{r}_i$. A desaceleração e parada do braço do escâner geram pequenos movimentos pendulares⁴ do braço, os quais se dissipam em menos de 5 s. Para garantir que o braço e, conseqüentemente, o microfone estejam parados no momento da gravação, uma pausa de 10 s é aplicada a fim de evitar tal viés.

Ainda sobre o *loop* do ensaio, seu critério de parada é dado por $i = N$, o qual finaliza o ensaio depois de gravar esse último ponto.

³No qual o microfone foi manualmente posicionado.

⁴Foi projetado e implementado um *soft start* e um *soft stop* para diminuir esses efeitos.

3. APLICAÇÃO

A função do escâner é realizar a tomada sequencial de medições de *respostas ao impulso* (RI), alterando a posição do microfone em função de uma lista de coordenadas pré-configuradas. O espectro $\tilde{H}(f)$ da resposta impulsiva de um ponto do espaço é calculada com a divisão espectral do sinal gravado, $\tilde{Y}(f)$, pelo sinal de excitação utilizado, $\tilde{X}(f)$, da seguinte forma,

$$\tilde{H}(f) = \frac{\tilde{Y}(f)}{\tilde{X}(f)}, \quad (4)$$

e a função temporal da RI, $h(t)$, é obtida com o cálculo da Transformada Inversa de Fourier de $\tilde{H}(f)$. Ainda, lembrando que no domínio discreto ($x[n]$, $y[n]$ e $h[n]$), para a estimativa da Equação (4) os vetores são condicionados para evitar o *aliasing*.

A RI de cada ponto é medida com o apoio do pacote (em Python) Pytta [23]. As RIs medidas *in situ* carregam a informação desejada da onda incidente e da onda difratada na superfície da amostra sob teste [19]. Além disso, as RIs possuem também a informação da reverberação do ambiente onde são medidas. Com isso, uma janela temporal Adrienne [24] é aplicada para isolar o registro da incidência direta da onda difratada pelo material (na reverberação do recinto). Essa aplicação em uma RI medida é exemplificada na Figura 8. Para a duração da seção em que $w(t) = 1$, 0 é levado em conta o tempo de chegada do som direto (distância entre fonte e microfone); o tempo envolvido na distância de viagem da reflexão especular e da difração nas bordas da amostra até o microfone. Assim, se a fonte encontrar-se suficientemente distante de outros aparatos refletivos presentes na sala, é possível isolar os fenômenos desejados da reverberação do recinto.

3.1 Espectro de número de onda (ou angular)

O espectro do número de onda é estimado a partir dos os espectros das RIs janeladas, coletadas pelo arranjo de microfones. O procedimento de cálculo segue o proposto por Nolan *et al.* [9]. Considere um cenário de medição contendo $\mathcal{M}$ pontos de leitura de pressão sonora. Tais pontos representam um arranjo de microfones, em que cada sensor tem coordenada $\mathbf{r}_m$. Os dados medidos nas

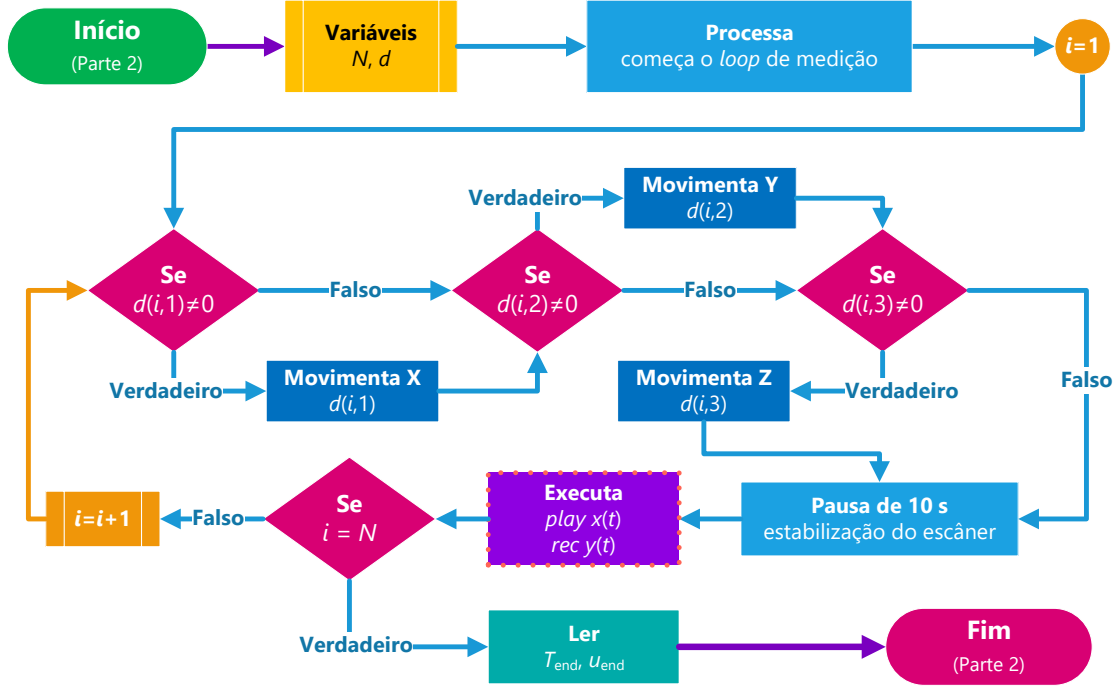


Figura 7: Fluxograma da segunda fase do ensaio com o escâner.

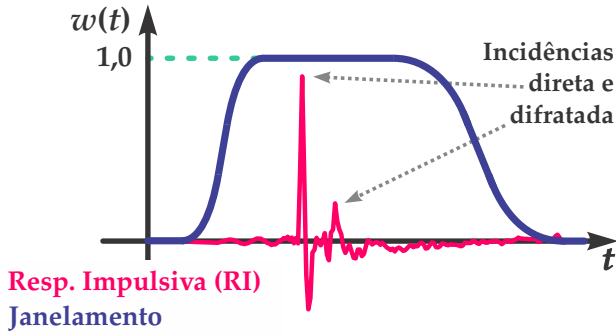


Figura 8: Ilustração do janelamento temporal da RI.

posições varridas pelos microfones podem ser projetados em uma base formada por $\mathcal{L}$ ondas planas propagantes. A equação matricial representando este problema é dada por

$$\tilde{\mathbf{p}} = \mathbf{H} \mathbf{x} + \mathbf{n}, \quad (5)$$

na qual $\tilde{\mathbf{p}} \in \mathbb{C}^{\mathcal{M}}$ contém as pressões sonoras capturadas pelas $\mathcal{M}$ posições (de microfone) para uma dada frequência; e $\mathbf{x} \in \mathbb{C}^{\mathcal{L}}$ representa as amplitudes complexas das $\mathcal{L}$ ondas planas, enquanto $\mathbf{n}$ representa os efeitos do ruído e das inconsistências do modelo matemático [6, 14, 15]. A matriz

de sensibilidade $\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{\mathcal{M} \times \mathcal{L}}$ é dada por

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} e^{-j\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r}_1} & e^{-j\mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r}_1} & \dots & e^{-j\mathbf{k}_{\mathcal{L}} \cdot \mathbf{r}_1} \\ e^{-j\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r}_2} & e^{-j\mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r}_2} & \dots & e^{-j\mathbf{k}_{\mathcal{L}} \cdot \mathbf{r}_2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ e^{-j\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r}_M} & e^{-j\mathbf{k}_2 \cdot \mathbf{r}_M} & \dots & e^{-j\mathbf{k}_{\mathcal{L}} \cdot \mathbf{r}_M} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

na qual se considera a convenção temporal $e^{j\omega t}$, omitida no restante do texto. Cada linha de $\mathbf{H}$ contém $\mathcal{L}$ ondas planas propagantes, que incidem no m -ésimo receptor. Os vetores de número de onda $\{\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \dots, \mathbf{k}_{\mathcal{L}}\}$ representam as direções de propagação das ondas planas contidas no modelo. Estas direções são distribuídas de maneira equiangular na superfície de uma esfera [9]. Ondas evanescentes não são consideradas neste modelo e $\mathbf{k}_{\ell} = (k_x, k_y, k_z)$, com

$$k_0 = \sqrt{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2} \quad (7)$$

sendo a magnitude do número de onda no ar.

É comum que $\mathcal{L} \gg \mathcal{M}$, o que faz a Equação (5) tornar-se um problema sub-determinado. Uma solução estável pode ser obtida usando regularização de Tikhonov [9, 14], expressa por

$$\tilde{\mathbf{x}} = \underset{\mathbf{x}}{\operatorname{argmin}} \left(\|\mathbf{H}\mathbf{x} - \tilde{\mathbf{p}}\|_2^2 + \lambda^2 \|\mathbf{x}\|_2^2 \right), \quad (8)$$



na qual as amplitudes complexas estimadas das ondas planas é $\tilde{\mathbf{x}}$ e $\lambda > 0$ representa o parâmetro de regularização que é calculado usando o critério da curva-L [25]. Os valores de todos os componentes de $\tilde{\mathbf{x}}$ representam o espectro do número de onda (ou angular) $\tilde{P}(k)$, com o qual é possível reconstruir o campo acústico no espaço próximo à amostra escaneada (p. ex.: na superfície de um material fonoabsorvente). A reconstrução da pressão sonora é calculada por [9]

$$\tilde{\mathbf{p}}_{\text{re}} = \mathbf{H}_{\text{re}} \tilde{\mathbf{x}}, \quad (9)$$

sendo que $\tilde{\mathbf{p}}_{\text{re}} \in \mathbb{C}^K$ representa as pressões complexas estimadas em K pontos, enquanto $\mathbf{H}_{\text{re}} \in \mathbb{C}^{K \times \mathcal{L}}$ é a matriz de reconstrução, que contém as funções de ondas planas avaliadas nos K pontos. A velocidade de partícula pode ser calculada a partir da equação de Euler, $\mathbf{u} = -\nabla p / (j k \rho c)$, o que leva à relação dada por

$$\tilde{\mathbf{u}}_{\text{re}} = \frac{-1}{j k \rho c} \nabla \mathbf{H}_{\text{re}} \tilde{\mathbf{x}}, \quad (10)$$

em que $\nabla \mathbf{H}_{\text{re}} \in \mathbb{C}^{K \times \mathcal{L}}$ contém o gradiente da matriz de reconstrução, ρ é a densidade do ar e c a velocidade do som no meio. Para a medição *in situ* de impedância de superfície, a reconstrução da pressão sonora e da componente normal da velocidade de partícula é feita em um ponto, $\mathbf{r}_s$, ou múltiplos pontos na superfície do material. Com isso, a impedância de superfície reconstruída pode ser estimada por

$$\tilde{Z}_s(\mathbf{r}_s) = -\frac{1}{\rho c} \frac{\tilde{p}(\mathbf{r}_s)}{\tilde{u}_n(\mathbf{r}_s)}, \quad (11)$$

com $\tilde{p}(\mathbf{r}_s)$ e $\tilde{u}_n(\mathbf{r}_s)$ calculados pelas Equações (9) e (10), respectivamente. O coeficiente de absorção, α , é dado por

$$\alpha = 1 - \left| \frac{\tilde{Z}_s \cos(\theta) - 1}{\tilde{Z}_s \cos(\theta) + 1} \right|^2, \quad (12)$$

no qual θ é o ângulo de incidência e $\tilde{Z}_s$ é a impedância reconstruída no ponto $\mathbf{r}_s$, ou, a média espacial da impedância $\tilde{Z}_s$ dos K pontos de reconstrução. A aplicação da média espacial tem por objetivo a minimização dos efeitos dos erros presentes no processo de reconstrução. Usualmente, a malha de pontos de reconstrução possui um tamanho suficientemente pequeno para que não ha-

jam grandes variações espaciais de $\tilde{Z}_s$, de acordo com a faixa de frequência considerada [14].

4. RESULTADOS

Nesta seção apresentam-se os resultados da medição da absorção de um material poroso. Os dados são relativos a dois ensaios com cenários similares, mas com arranjos de diferentes dimensões. Em ambos os casos é utilizado um arranjo regular de dupla camada, similar aos arranjos usados nas referências [16, 19]. A Tabela 1 apresenta o comprimento e largura de ambos arranjos, bem como o número de microfones em cada camada. A camada de microfones mais próxima da amostra está a 1,30 cm da superfície e a mais distante a 4,20 cm. A amostra medida trata-se de uma placa SONEX Illtec plana chanfrada, com dimensões de $62,5 \times 62,5 \text{ cm}^2$ e espessura de 3,5 cm. A Figura 9 apresenta um esquemático dos arranjos relativamente ao tamanho da amostra. Note que o Arranjo 1 é um pouco maior do que a amostra na direção $\hat{y}$, o que permite que capte mais informações do processo de difração nas bordas da amostra.

Tabela 1: Dados dos arranjos utilizados na medição.

Arranjo	Tamanho [cm] $L_x \times L_y$	Pontos	
		n_x	n_y
1	$42,0 \times 65,0$	8	13
2	$30,0 \times 40,0$	6	8

O campo acústico é excitado por uma pequena fonte sonora de *baffle* esférico, suspensa a 1,40 m da superfície do material.

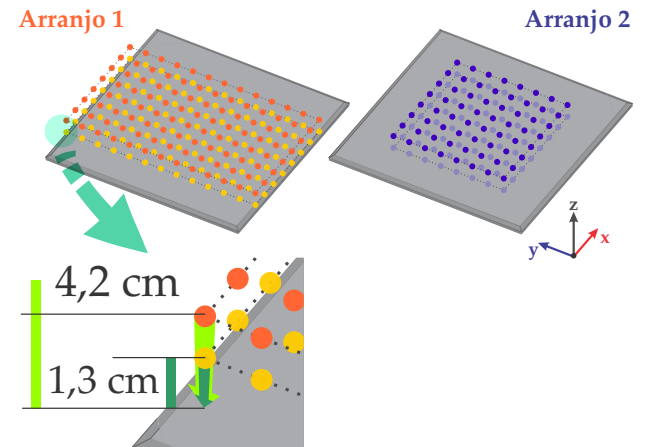


Figura 9: Distribuição dos pontos de cada arranjo.

4.1 Espectro de número de onda (angular)

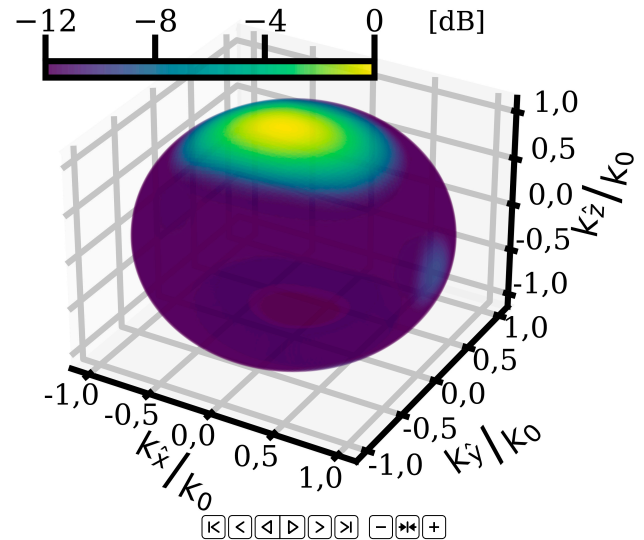
Para ambos os cenários medidos, as RIs gravadas e janeladas foram decompostas em 2.562 componentes de ondas planas propagantes, que compõem o espectro no domínio do número de onda (ou angular), $\tilde{P}(k)$, estimado com a Equação (8).

A magnitude do espectro $|\tilde{P}(k)|$ pode ser expressa num gráfico tridimensional, no qual cada coordenada (k_x, k_y, k_z) representa as direções de viagem das $\mathcal{L}$ ondas planas. Assim, o hemisfério inferior representa a magnitude das ondas planas incidentes, e o hemisfério superior, a magnitude das ondas refletidas. Para $f = 500$ Hz os espectros $\tilde{P}(k)$ obtidos (pelo método direto) com os arranjos estão apresentados na Figura 10, as magnitudes $|\tilde{P}(k)|$ são impressas em cores na superfície da esfera⁵ — a rigor a esfera possui raio k_0 rad/m, mas foi plotada com raio unitário.

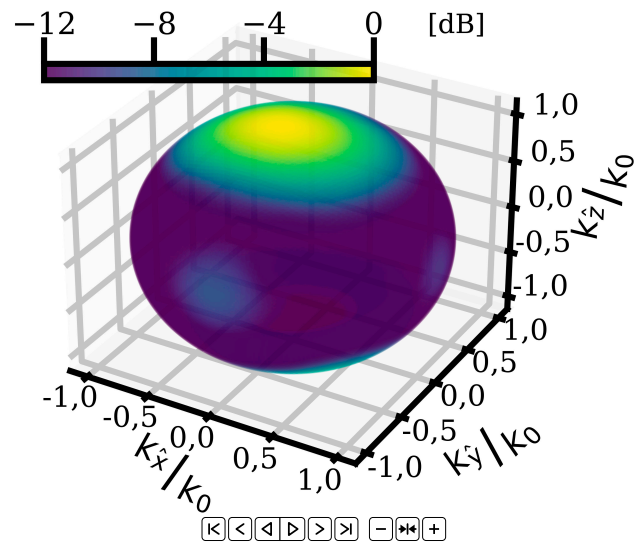
Cada um dos espectros na Figura 10 mostra magnitudes concentradas em dois lóbulos principais com direções opostas, que equivalem às direções de incidência e reflexão especular. Os lóbulos secundários representam componentes difratadas pela descontinuidade de impedâncias entre a amostra e a superfície rígida próxima a ela (piso). Note também que o lóbulo referente a direção de incidência fica um pouco oculto pelo restante da esfera.

Para uma melhor visualização das componentes contidas no espectro angular, é possível plotá-las em um gráfico 2D, com seus eixos dados pelos ângulos de elevação, θ , e azimuth, ϕ . A Figura 11 mostra a magnitude dos espectros angulares, $|\tilde{P}(\theta, \phi)|$ para as frequências de $f = 500$ Hz, $f = 1.000$ Hz e $f = 2.000$ Hz (colunas) para os Arranjos 1 e 2 (linhas).

Note que $\theta = 0^\circ$ representa a direção de incidência normal à amostra. Para as três frequências pode-se visualizar que a direção de incidência concentra as maiores magnitudes, o que é esperado já que esta direção mensura a magnitude das ondas que não sofrem qualquer absorção sonora ou difração. Já as direções com $\theta = 180^\circ$ representam a magnitude das ondas planas em reflexão especular. Note que tais componentes diminuem de magnitude com a frequência, o que é um efeito



(a) Arranjo 1.



(b) Arranjo 2.

Figura 10: Espectro $\tilde{P}(k)$ dos arranjos para $f = 500$ Hz.

do aumento da absorção sonora com a frequência, típico de um material poroso. Comparando os espectros $|\tilde{P}(\theta, \phi)|$ dos Arranjos 1 e 2, é possível notar que os lóbulos secundários diferem em magnitude, o que é atribuído à diferença de tamanho entre os arranjos. Somado ao modelo do campo acústico, que considera apenas ondas planas, isso faz com que os Arranjos 1 e 2 tenham diferentes capacidades de captar informações espaciais do processo de difração. Uma análise formal desse fenômeno está fora do escopo deste artigo e pode ser encontrada em Brandão & Fernandez-Grande [19].

⁵Utilizando os leitores de PDF Acrobat ou Foxit use os comandos de baixo das figuras para acionar as animações.

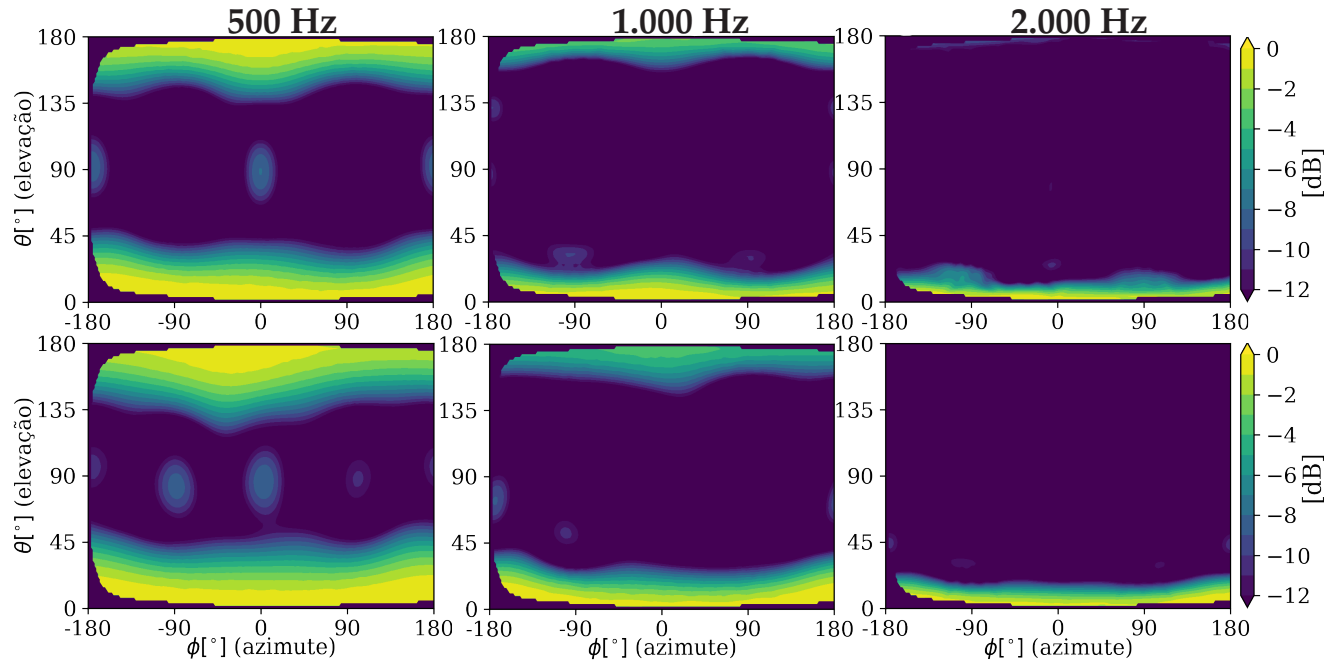
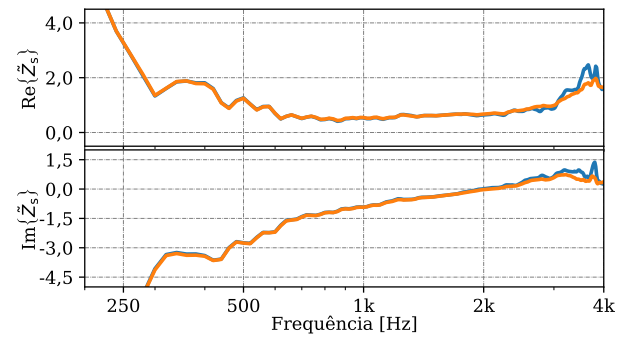


Figura 11: Espectros $|\tilde{P}(\theta, \phi)|$ dos Arranjos 1 (linha superior) e 2 (linha inferior) para $f = \{500, 1.000, 2.000\}$ Hz.

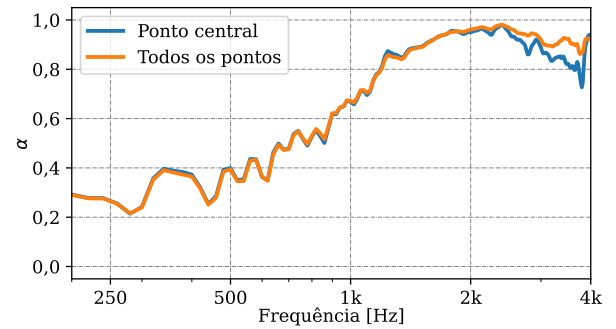
4.2 Impedância de superfície e coeficiente de absorção

A impedância de superfície Z_s foi reconstruída de duas maneiras: (i) em um ponto no centro da superfície do material; e (ii) em uma malha de 21×21 pontos, regularmente distribuídos num espaço de 10 cm^2 centrados na superfície do material. No caso (ii), a impedância de superfície resultante é uma média espacial das Z_s obtidas nos 21×21 pontos. A Figura 12 mostra uma comparação dos coeficientes de absorção obtidos com as reconstruções (i) e (ii) para o Arranjo 1. Dentro da faixa de frequência considerada, a variação espacial da impedância Z_s é observada na região das altas frequências, com a reconstrução (i) mostrando-se um pouco menos confiável do que a média espacial tomada na reconstrução (ii).

A Figura 13 apresenta as impedâncias de superfície e os coeficientes de absorção reconstruídos na malha de 21×21 pontos (10 cm^2) com os Arranjos 1 e 2. Nas baixas frequências ocorrem maiores discordâncias entre as curvas de impedância e absorção dos dois arranjos. Devido ao seu maior tamanho, o Arranjo 1 coleta uma maior influência das bordas do material, o que ajuda a explicar as diferenças entre as curvas. Mais estudos a esse respeito precisam ser conduzidos, especialmente considerando o efeito da inclusão das ondas evanescentes no modelo de campo acústico [19]. Note, no entanto, que o dispositivo de



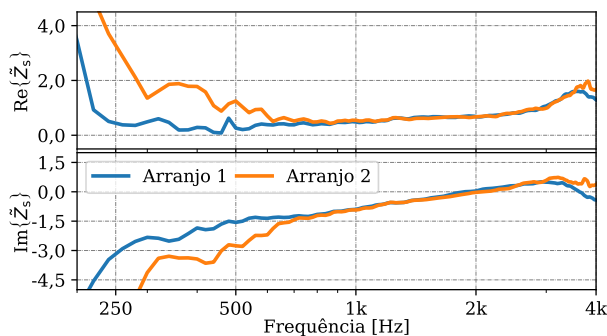
(a) Impedâncias de superfície normalizada.



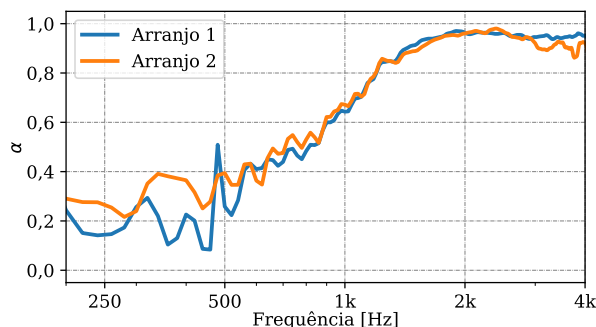
(b) Coeficientes de absorção.

Figura 12: Reconstrução de Z_s e de α (medições com Arranjos 1 e 2).

escaneamento de campo acústico é capaz de representar o comportamento geral da absorção sonora do material poroso com confiabilidade [1].



(a) Impedâncias de superfície normalizada.



(b) Coeficientes de absorção.

Figura 13: Reconstrução de Z_s e de α (medições com Arranjos 1 e 2).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou, de forma sucinta, os passos envolvidos na construção de um protótipo de escâner para a medição sequencial de respostas ao impulso (RI). Mostrou-se que seu princípio de funcionamento é análogo ao de impressoras 3D, mas no lugar do extrusor⁶ é fixado um longo suporte com um microfone colocado na sua extremidade. Trabalhou-se para que não existisse dificuldades em operar o escâner, além de que a programação em Python possibilitou editar, atualizar ou até mesmo mudar as interfaces de programação utilizadas (Telemetrix e NIDAQmx).

A seção de *desenvolvimento do sistema*⁷ deste documento apresentou os detalhes fundamentais envolvidos no projeto do escâner, assim como a seção de *aplicação*⁸ delineou a teoria envolvida para cálculo de parâmetros acústicos. A evolução do projeto também contou com outras diferentes atividades que foram fundamentais, como por exemplo, a verificação da precisão do deslocamento dos eixos. Esse e outros detalhes mais

específicos do projeto do escâner serão ainda abordados na dissertação de mestrado do primeiro autor deste artigo.

Os resultados de uma medição de impedância *in situ* foram também apresentados e discutidos de maneira abreviada, visto que o objetivo deste artigo foi mostrar a construção e operacionalização do protótipo. Outrossim, os espectros $\tilde{P}(\mathbf{k})$, as curvas de impedância e de absorção apresentaram comportamentos coerentes com os cenários medidos e com a literatura vigente.

Numa publicação futura (ou na dissertação do primeiro autor) serão abordados também informações mais específicas a respeito do processamento das gravações. Isto é, o processo de decomposição e reconstrução do campo acústico serão mais aprofundados, explorando diferentes métodos de solução do sistema indeterminado (da Equação 5), assim como a relação entre os parâmetros envolvidos em cada passo do processamento e as respectivas variações que implicam nos resultados.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro parcial a este trabalho por meio do edital universal (processo n° 402633/2021-0). Também gostariam de reconhecer o Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES – bolsa n° 88887.488185/2020-00).

Os autores também gostariam de agradecer todo o apoio e infraestrutura fornecidos pelo curso de Engenharia Acústica (EAC) e Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

REFERÊNCIAS

- [1] Brandão, Eric. *Acústica de Salas: Projeto e Modelagem*. 1ª ed. São Paulo: Blucher, 2016. ISBN 978-8521210061.
- [2] Fonseca, William D'A. *Beamforming considerando difração acústica em superfícies cilíndricas*. Tese de doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2013. Disponível em: <http://www.bu.ufsc.br/teses/PEMC1445-T.pdf>. ISBN 978-8591677405.
- [3] Johnson, D. H. e Dudgeon, D. E. *Array Signal Processing: Concepts and Techniques*. Prentice Hall PTR, Feb. 1993. ISBN 978-0130485137.

⁶Parte da impressora que empurra o filamento de impressão.

⁷Veja a Seção 2.

⁸Veja a Seção 3.



- [4] Sijtsma, Pieter. Experimental techniques for identification and characterisation of noise sources. Em *Advances in Aeronautics & Applications – VKI Lecture Series*, Rhode-Saint-Genèse, Belgium, March 2004. Disponível em: <https://bit.ly/NLR-TP-2004-165>. Also in Netherlands Aerospace Centre (NLR) Technical Reports (NLR-TP-2004-165).
- [5] Maynard, Julian D; Williams, Earl G e Lee, Y. Near-field acoustic holography: I. Theory of generalized holography and the development of NAH. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 78(4): 1395–1413, 1985. doi: [10.1121/1.392911](https://doi.org/10.1121/1.392911).
- [6] Hald, Jørgen. Basic theory and properties of statistically optimized near-field acoustical holography. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 125(4): 2105–2120, 2009. doi: [10.1121/1.3079773](https://doi.org/10.1121/1.3079773).
- [7] Fernandez-Grande, Efren. Sound field reconstruction using a spherical microphone array. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 139(3):1168–1178, 2016. doi: [10.1121/1.4943545](https://doi.org/10.1121/1.4943545).
- [8] Zea, Elias. *Sound field separation with microphone arrays*. Tese de doutorado, KTH Engineering Sciences, Stockholm, Sweden, 2017. Disponível em: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1157713/FULLTEXT01.pdf>. ISBN 1651-7660.
- [9] Nolan, M.; Verburg, S.; Brunskog, J. e Fernandez-Grande, E. Experimental characterization of the sound field in a reverberation room. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 145:2237–2246, 2019. doi: [10.1121/1.5096847](https://doi.org/10.1121/1.5096847).
- [10] Gover, B.N.; Ryan, J.G. e Stinson, M.R. Microphone array measurement system for analysis of directional and spatial variations of sound fields. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 112:1980–1991, 2002. doi: [10.1121/1.1508782](https://doi.org/10.1121/1.1508782).
- [11] Park, M. e Rafaely, B. Sound-field analysis by plane-wave decomposition using spherical microphone array. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 118: 3094–3103, 2005. doi: [10.1121/1.2063108](https://doi.org/10.1121/1.2063108).
- [12] Tamura, M. Spatial Fourier transform method of measuring reflection coefficients at oblique incidence. I: Theory and numerical examples. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 88(5):2259–2264, 1990. doi: [10.1121/1.400068](https://doi.org/10.1121/1.400068).
- [13] Tamura, M.; Allard, J.F. e Lafarge, D. Spatial Fourier-transform method for measuring reflection coefficients at oblique incidence. II: Experimental results. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 97 (4):2255–2262, 1995. doi: [10.1121/1.412940](https://doi.org/10.1121/1.412940).
- [14] Richard, A.; Fernandez-Grande, E.; Brunskog, J. e Jeong, C-H. Estimation of surface impedance at oblique incidence based on sparse array processing. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 141(6):4115–4125, 2017. ISSN 0001-4966. doi: [10.1121/1.4988560](https://doi.org/10.1121/1.4988560).
- [15] Nolan, Melanie. Estimation of angle-dependent absorption coefficients from spatially distributed in situ measurements. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 147(2):EL119–EL124, 2020. doi: [10.1121/10.0000716](https://doi.org/10.1121/10.0000716).
- [16] Hald, J.; Song, W.; Haddad, K.; Jeong, C. e Richard, A. In-situ impedance and absorption coefficient measurements using a double-layer microphone array. *Applied Acoustics*, 143:74–83, 2018. doi: [10.1016/j.apacoust.2018.08.027](https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2018.08.027).
- [17] Kleiner, M.; Gustafsson, H. e Backman, J. Measurement of directional scattering coefficients using near-field acoustic holography and spatial transformation of sound fields. Em *Proceedings of the 99th Audio Engineering Society Convention, New York, USA*, págs. 331–346. Audio Engineering Society, 1995. Disponível em: <https://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=7857>.
- [18] Richard, A.; Fernández Comesaña, D.; Brunskog, J.; Jeong, C-H e Fernandez-Grande, E. Characterization of sound scattering using near-field pressure and particle velocity measurements. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 146(4):2404–2414, 2019. doi: [10.1121/1.5126942](https://doi.org/10.1121/1.5126942).
- [19] Brandão, Eric e Fernandez-Grande, Efren. Analysis of the sound field above finite absorbers in the wave-number domain. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 151(5):3019–3030, 2022. doi: [10.1121/10.0010355](https://doi.org/10.1121/10.0010355).
- [20] Yorins, Alan. Telemetrix, 2021. Disponível em: <https://github.com/MrYsLab/telemetrix>.
- [21] Hindes, Zach. nidaqmx-python – A Python API for interacting with NI-DAQmx, 2022. Disponível em: <https://github.com/ni/nidaqmx-python>.
- [22] Brandão, Eric. *Análise teórica e experimental do processo de medição in situ da impedância acústica*. Tese de doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, 2011. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/95225>.
- [23] Fonseca, William D'Andrea; Paes, João V.; Lazarin, Matheus; Reis, Marcos V.; Mareze, Paulo H. e Brandão, Eric. Pytta: Open source toolbox for acoustic measurement and signal processing. Em *Proceedings of the 23rd International Congress on Acoustics (ICA)*, págs. 1–8, Aachen, Germany, 2019. ISBN 978-3939296157. doi: [10.18154/RWTH-CONV-239980](https://doi.org/10.18154/RWTH-CONV-239980).
- [24] Garai, Massimo e Guidorzi, Paolo. European methodology for testing the airborne sound insulation characteristics of noise barriers in situ: Experimental verification and comparison with laboratory data. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 108(3): 1054–1067, 2000. doi: [10.1121/1.1286811](https://doi.org/10.1121/1.1286811).
- [25] Hansen, Per Christian. *Discrete inverse problems. Insight and algorithms*. 1ª ed. USA: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2010. ISBN 978-0898716962.