

FIA 2020/22

XII CONGRESSO/CONGRESO IBEROAMERICANO DE ACÚSTICA

XXIX ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA - SOBRAC

Florianópolis, SC, Brasil

Integração de múltiplas toolboxes para aplicação em beamforming e aeroacústica

Ackermann, M. M.¹; Fonseca, W. D'A.¹; Mareze, P. H.¹; Casagrande Hirono, F.²

¹ Engenharia Acústica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil,
{michael.ackermann, paulo.mareze, will.fonseca}@eac.ufsm.br

² University of Salford, Salford, England, United Kingdom, F.CasagrandeHirono@salford.ac.uk

Resumo

Beamforming é uma técnica de imageamento acústico que permite visualizar cenários sonoros por meio da geração de imagens acústicas, as quais podem ser tratadas como mapas. A técnica trabalha com o processamento de sinais adquiridos via a utilização de um arranjo de microfones, dessa maneira, necessitando de implementação computacional para que possa ser aplicada. Atualmente existem diversas *toolboxes* (ou conjunto de ferramentas) para trabalhar com a técnica, cada uma traz suas características únicas de implementação — podendo incluir peculiaridades de suas distintas áreas de atuação. Desse modo, seria frutífero poder combinar tais ferramentas, extraindo e utilizando a sua parte aprimorada. Este trabalho propõe e descreve o desenvolvimento de um novo *conjunto de ferramentas* que permite a integração entre *toolboxes*, trazendo consigo a facilitação da utilização e de compartilhamento de entradas e saídas. A *toolbox* em desenvolvimento facilita a comunicação entre as ferramentas de *beamforming* Acoular, Beamap e aquela dentro do ITA Toolbox — sendo a primeira em linguagem Python e as duas últimas em Matlab. Além disso, propicia a conexão entre o Acoular e o Amiet Tools, este focado em aeroacústica, a fim de simplificar a sofisticada criação de *mapas acústicos* para dados simulados de predição de ruído causado pela interação da turbulência com aerofólios. O presente artigo aclara detalhes de desenvolvimento, bem como demonstra resultados computais de *beamforming*, obtidos nas integrações entre ferramentas. O estudo faz parte dos desenvolvimentos do grupo de pesquisa em processamento de sinais e imageamento acústico da Engenharia Acústica da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

Palavras-chave: beamforming, aeroacústica, Python, Matlab, imageamento acústico, processamento de sinais.

PACS: 43.60.Lq; 43.28.Ra; 43.60.-c.

Integration of multiple toolboxes for application in beamforming and aeroacoustics

Abstract

Beamforming is an acoustic imaging technique that allows the visualization of sound scenes via the generation of acoustic images, which can be treated as maps. The technique works with the processing of signals acquired with an array of microphones, therefore requiring a computational implementation to be applied. Currently, there are several toolboxes to work with the technique, each with its unique implementation characteristics — including peculiarities of their different application fields. On that account, it would be fruitful to combine such tools, extracting and using their specialized parts. This work proposes and describes the development of a new set of tools that allows the integration between such toolboxes. It aims to facilitate the combined use and the sharing of inputs and outputs. The toolbox under development helps communicating between the beamforming tools Acoular, Beamap, and the tool within the ITA Toolbox — with the first one being in Python and the last two in Matlab language. Furthermore, it provides a connection between Acoular and Amiet Tools, the latter focused on aeroacoustics — simplifying the sophisticated creation of acoustic maps for simulated noise prediction data caused by the interaction of a turbulent velocity field with the leading edge of an airfoil. This article clarifies development details, as well as demonstrates computational results of beamforming, obtained with the integration between tools. The study is part of the developments of the research group in signal processing and acoustic imaging of the Acoustical Engineering of the Federal University of Santa Maria (UFSM), in south Brazil.

Keywords: beamforming, aeroacoustics, Python, Matlab, acoustical imaging, digital signal processing.



1. INTRODUÇÃO

A quantidade de *toolboxes* (ou *conjunto de ferramentas*) disponíveis para utilização de cientistas, estudantes e pesquisadores aumentam gradativamente com o passar do tempo, porém meios de comunicação entre essas *toolboxes* não é algo comum de ser encontrado. Disponíveis nas mais diversas linguagens de programação, cada conjunto de ferramentas tende a ter suas próprias características, as quais demonstram destaque em meio a outras. Combinar tais conjuntos é de grande proveito pois permite utilizar as partes mais aprimoradas de cada um deles, facilitando e/ou possibilitando a obtenção de novos resultados.

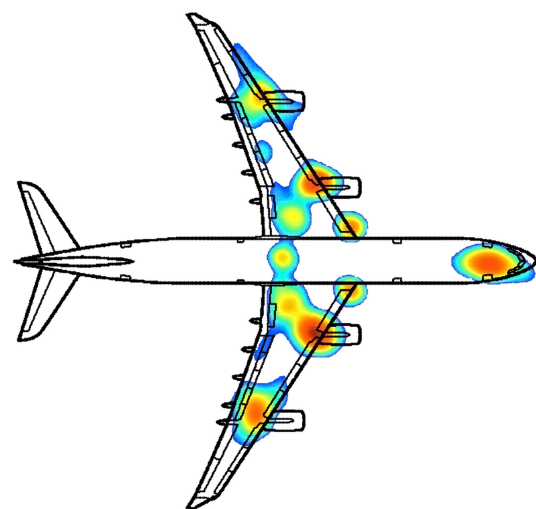
Ferramentas criadas para uso em acústica de código aberto (*open-source*) são comumente encontradas nas linguagens Python e Matlab. Algumas delas possuem maior abrangência de implementações e exploram as mais diversas áreas dentro da acústica como o ITA-Toolbox [1]. Também é possível citar o Acoular [2] e Beamap [3, 4], que especializam-se no *imageamento acústico* por meio da técnica de *beamforming*. Outra ferramenta importante é o Amiet Tools [5], voltada para a aplicação na área da aeroacústica. Esta possui um modelo de predição de ruído radiado pela interação de um aerofólio (do tipo placa-plana) com fluxo turbulento.

A combinação de tais ferramentas permite que seja possível a utilização em conjunto das partes especializadas de cada uma. Por exemplo, pode-se usufruir dos dados gerados pelo Amiet Tools em conjunto com as técnicas de *imageamento* do Acoular. Assim, é possível realizar uma visualização aprimorada do ruído radiado pela interação do *bordo de ataque* de um aerofólio com um escoamento turbulento. É nesse contexto que o presente trabalho apresenta a parte referente ao desenvolvimento de uma nova *toolbox* de integração computacional. Ademais, resultados de *beamforming* obtidos por meio da combinação das ferramentas são discutidos, de acordo.

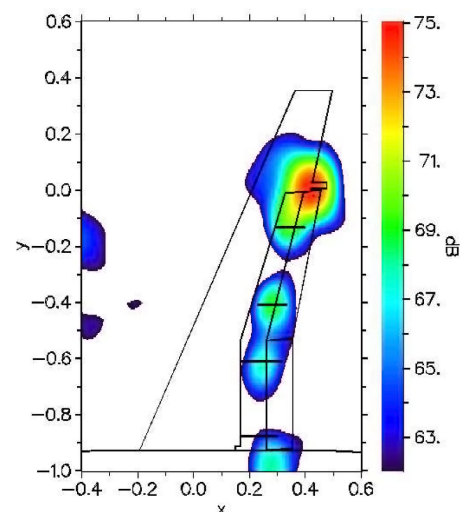
2. BEAMFORMING

O *beamforming* acústico é uma técnica de *imageamento acústico* que envolve a utilização de um arranjo de microfones (receptores), os quais são capazes de medir a pressão sonora para um determinado campo sonoro em análise [6, 7]. Os

sinais adquiridos por cada um dos microfones do arranjo devem ser processados (atrasados e somados, por exemplo), para que possa ser criada uma imagem. Geralmente a imagem apresenta-se como uma malha discretizada que representa o plano de medição observado, apontando a estimativa de *pressão sonora*. Os pontos na malha são apresentados com o uso de uma escala de cores (similar aos resultados de uma câmera de calor), permitindo assim a compreensão da imagem como uma espécie de mapa, conforme os exemplos da Figura 1. Os pormenores da técnica básica podem ser verificados no livro texto de Johnson & Dudgeon [8].



(a) Airbus A340



(b) Fokker 100

Figura 1: Exemplos de imagem acústica obtida com a técnica de *beamforming*. (a) Airbus A340 (durante a aproximação); e (b) Asa do Fokker 100 (teste em túnel de vento) — adaptado de Sijtsma [7].

No projeto de arranjos, diversos tipos de geometrias podem ser planejadas, de 1D até 3D, dependendo da aplicação. Os arranjos (ou *arrays*), em geral, podem trazer variações de tamanho, quantidade de microfones, geometria (ou seja, a distribuição dos receptores no espaço) e ponderação espacial. Todos os aspectos de um arranjo tendem a influenciar diretamente na aplicação técnica, já que cada configuração possui características que tendem a ser melhores aproveitadas para um determinado problema. Os arranjos são projetados para atuar de forma adequada para determinadas faixa(s) de frequência(s) e distância(s). Desse modo, cada arranjo tem uma própria faixa dinâmica (DR, *dynamic range*) e largura de feixe (BW, *beamwidth*). Essas características são efeitos do janelamento e amostragem espacial, as quais são extremamente dependentes da frequência e outras configurações do arranjo (tais como geometria, distância do plano observado, entre outros) [7]. Assim, a escolha do arranjo geralmente é realizada após a identificação do problema, a fim de que ele seja condicionado para obter-se o máximo aproveitamento dos resultados ao realizar o imageamento.

Os processamentos utilizados para a realização do *beamforming* buscam utilizar os sinais adquiridos durante a medição dentro de um algoritmo que estima o campo sonoro gerado pela(s) fonte(s) sonora(s) na região focal do arranjo. Mesmo existindo uma variedade de algoritmos a serem utilizados, vale a pena ressaltar a existência do atraso-e-soma (um dos primeiros e mais conhecidos a serem criados), podendo ser computado tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência [8].

3. TOOLBOXES

Toolboxes tendem a ser encontradas nas mais diversas linguagens de programação, podendo elas serem de acesso público ou privado. Conhecidas também como *caixas de ferramentas* (ou conjuntos), possuem enfoque em uma ou mais áreas de aplicação, sendo que trazem consigo recursos — funções, classes e até mesmo rotinas — voltados para a área na qual foram desenvolvidas para atuar.

A existência de tais conjuntos permite que seja possível encontrar implementações funcionais de

pronta utilização para a resolução de problemas. Isso evita que seja necessário realizar uma implementação do zero, aumentando o tempo do usuário para focar na resolução do problema em vez de focar na criação das ferramentas para resolvê-lo. Tais conjuntos também estimulam o reuso de códigos existentes, facilitando a identificação e correção de possíveis erros no programa pela base de usuários e desenvolvedores [9].

Portanto, nesta seção serão apresentadas as *toolboxes* utilizadas — Acoular, Amiet Tools, Beamap e ITA-Toolbox — com uma breve aclaração de suas respectivas capacidades.

3.1 Acoular

Acoular¹ é um módulo (ou pacote) de código aberto escrito na linguagem Python desenvolvido pela Universidade Técnica de Berlim, na Alemanha [2]. Ele segue o paradigma de programação de orientação de objetos, com intuito de ser utilizado em aplicações de imageamento acústico (*beamforming*). Dessa forma, dispõe de ferramentas para aquisição e pós-processamento de dados.

O módulo fornece a possibilidade utilizar diversos algoritmos de *beamforming* (atraso-e-soma, por técnicas de autovalor e autovetor, entre outros), métodos de deconvolução (como DAMAS [10] e CLEAN-SC [11]), geradores de sinais (senoidais, ruído branco e ruído rosa), além de outras ferramentas.

3.2 Amiet Tools

Desenvolvido em Python por Casagrande Hirono [5], Amiet Tools² é uma *toolbox* de código aberto que implementa o modelo analítico de Amiet para a predição de salto de pressão sonora gerado sobre um aerofólio pela interação de seu bordo de ataque com um escoamento turbulento. Este modelo é muito popular devido a sua simplicidade formal e possibilidade de expansões matemáticas.

O modelo de Amiet considera um aerofólio do tipo placa-plana em campo livre. Com isso, é aplicada a decomposição de um escoamento turbulento por uma soma de Fourier, no qual cada componente representa uma rajada e permite o

¹<http://acoular.org> e <https://github.com/acoular>.

²https://github.com/fchirono/amiet_tools.



cálculo do salto de pressão sobre a superfície do aerofólio. Prosseguindo, com os parâmetros obtidos é possível aplicar a analogia acústica de Ffowcs-Williams e Hawkins [12] para calcular a radiação acústica, ao considerar que existe uma distribuição de fontes do tipo dipolo pontual sobre a superfície do aerofólio.

O Amiet Tools permite ao usuário utilizar a implementação completa do modelo, trazendo funções para calcular tanto a pressão sobre a superfície quanto as densidades espectrais cruzadas do ruído irradiado. Inclui ainda códigos de exemplo para demonstrar o funcionamento da ferramenta.

3.3 Beamap

A *toolbox* Beamap³ é escrita na linguagem Matlab por William D'Andrea Fonseca, sendo uma ferramenta que é utilizada em ambiente educacional. Desenvolvida para fins didáticos [4], traz uma implementação de forma simplificada de conceitos complexos da área de *beamforming*.

A ferramenta permite ao usuário utilizar funções para criação de geometrias de arranjos, avaliação da *função de espalhamento pontual* (PSF⁴) de um arranjo, cálculo da largura de feixe (BW) e faixa dinâmica (DR), aplicação da técnica de *beamforming* utilizando algoritmo clássico (atraso-soma, tempo e frequência) e convencional, como também, outras ferramentas de ampla utilização para processamento digital de sinais. O próprio Beamap tem funcionalidades que facilitam a conexão com sua versão em LabVIEW, além de arranjos e dados provenientes de outros *software* como da HBK, Gfai Acoustic Camera, OptiNav, ITA-Toolbox e o padrão usado no Projeto Aero-nave Silenciosa (da Embraer).

3.4 ITA-Toolbox

O ITA-Toolbox⁵ é desenvolvido pelo ITHA (Institute for Hearing Technology and Acoustics) da Universidade RWTH de Aachen na Alemanha. Disponibilizado na linguagem Matlab é um con-

junto de ferramentas voltado para atuar nas áreas de acústica ao implementar soluções de problemas comuns e avançados dentro das tarefas de pós-processamento de sinais [1]. O ITA Toolbox dispõe de uma variedade de ferramentas para auxiliar na aquisição de sinais (por meio de medições), importação e exportação de dados, representação gráfica de sinais, sua manipulação, dentre outros. Consequentemente, com toda essa quantidade de ferramentas o conjunto ganha destaque ao ter implementações para as áreas de acústica de salas, imageamento acústico com *beamforming*, caixas acústicas, acústica numérica, psicoacústica, e assim por diante.

4. A TEORIA DE AMIET

Aerofólios quando submetidos a um escoamento turbulento respondem de maneira a gerar ruído, especialmente no *bordo de ataque* (*leading-edge*) e no *bordo de fuga* (*trailing-edge*). Em casos em que a intensidade da turbulência no escoamento for maior que a turbulência da camada limite, a radiação de ruído é dominado pelo som gerado no bordo de ataque do aerofólio.

Amiet em 1975 [13] apresentava um trabalho fundamental sobre o ruído gerado por um aerofólio de placa-plana quando exposto a um escoamento turbulento. O estudo demonstrou que o ruído resultante do problema está associado de forma direta pelas flutuações de pressão instáveis sobre a superfície do aerofólio observado. O modelo proposto por Amiet permite que seja realizado a previsão do ruído do bordo de ataque de um aerofólio. Na estimativa leva-se em consideração a densidade espectral de potência cruzada⁶ da pressão na superfície da estrutura, quando o aerofólio é submetido a um fluxo turbulento caracterizado pelo seu espectro de energia.

Visto que este artigo não tem como foco aclarar totalmente a teoria de Amiet, recomenda-se os seguintes trabalhos que apresentam a teoria com uma maior gama de detalhes: Santana [14]; e Miotto e Wolf [15]. Contudo, o presente trabalho apresentará de forma sucinta o modelo concebido por Amiet como apresentados por Casagrande Hirono [5, 16, 17].

³Originalmente o acrônimo significava “Beamforming Mapping Software”, no entanto, com a expansão de suas ferramentas, foi rebatizado de “Beamforming Multiple Analysis Platform”. Ademais da versão educacional em Matlab, existe também uma versão em LabVIEW.

⁴Point Spread Function.

⁵<https://git.rwth-aachen.de/ita/toolbox>.

⁶Cross-power spectral density.

4.1 Pressão na superfície do aerofólio

Considere um aerofólio com corda de $2b$, envergadura de $2d$ e espessura infinitesimal, em que ele idealmente está centralizado em relação ao plano de coordenadas (com o eixo z voltado para cima, ou seja, saindo da figura). Dessa forma, a Figura 2 ilustra um aerofólio inserido em um escoamento turbulento, representado por uma rajada oblíqua e periódica, a qual possui uma velocidade média de U_x com direção positiva em relação ao eixo x . A rajada representada move-se no plano $z = 0$ e é dada por um par de números de onda hidrodinâmicos k_x e k_y , um no sentido da corda e outro no da envergadura.

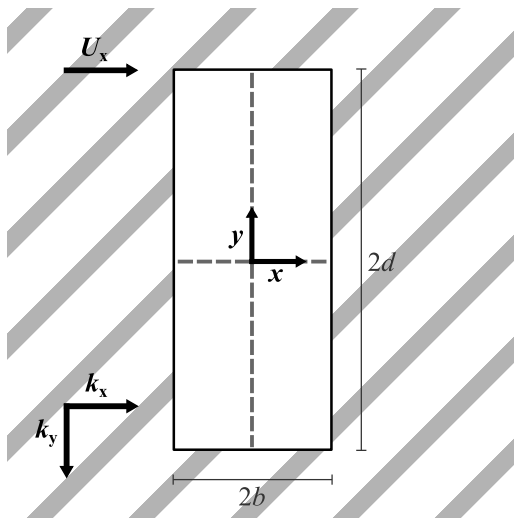


Figura 2: Aerofólio de espessura infinitesimal centralizado nos planos x e y , imerso em um fluxo turbulento com rajadas oblíquas (U_x) de ângulo $\zeta = \arctan(k_y/k_x)$.

Avaliando ainda o problema é importante ressaltar que os pontos no espaço ao redor do aerofólio são representados por $\mathbf{r} = (x, y, z)$ e sob a superfície do aerofólio com $\mathbf{r}_s = (x_s, y_s, z_s)$. Logo, seguindo com as considerações previamente realizadas, é possível encontrar a expressão do salto de pressão sobre a superfície do aerofólio dada por

$$\Delta p(x_s, y_s, \omega) = 2\pi\rho_0 \int_{-\infty}^{+\infty} w(k_x, k_y) g(x_s, k_x, k_y) e^{-jk_y y_s} dk_y, \quad (1)$$

na qual $w(k_x, k_y)$ é a amplitude da rajada inci-

dente, $k_x = \omega/U_x$ é número de onda da rajada no sentido da corda para a frequência $\omega = 2\pi f$ e $g(x_s, k_x, k_y)$ é o salto de pressão adimensional sobre a corda x_s devido a cada componente da rajada dada por (k_x, k_y) .

Contudo, como a turbulência é um fenômeno estocástico, o problema tende a ser examinado por meio estatístico, sendo assim, a *densidade espectral de potência cruzada* entre o salto de pressão de superfície em dois pontos (x_s, y_s) e (x'_s, y'_s) é expressa pela Equação (2), em que $\Phi_{ww}(k_x, k_y)$ é a densidade espectral do número de onda da turbulência incidente no aerofólio.

4.2 Radiação acústica e a aproximação para campo próximo e distante

A pressão acústica total radiada pelo aerofólio de placa-plana é obtida por meio da consideração de que o ruído gerado, pela interação com a turbulência, pode ser calculado ao seguir a analogia acústica de Ffowcs-Williams e Hawkins [12]. Esta considera uma distribuição de fontes pontuais do tipo dipolo, na qual o salto de pressão presente na superfície da placa atua com a amplitude dos dipolos equivalentes. Prosseguindo com essas considerações, a Equação (2) pode ser expandida a ponto de levar em consideração os efeitos de campo próximo e de rajadas subcríticas [17].

Posto isto, $p(\mathbf{r}, \omega)$ é a pressão acústica recebida por um observador localizado em $\mathbf{r} = (x, y, z)$. Ademais, pode-se obter uma formulação analítica simplificada da pressão acústica radiada no campo distante (*far-field*), conforme demonstrado por Amiet [13].

Considerando-se todos os aspectos previamente mencionados, é possível utilizar o modelo de Amiet para simular a medição acústica do ruído de interação turbulência-placa plana com um arranjo de microfones, seguido pela reconstrução da pressão sobre o aerofólio por meio da técnica de *beamforming*. Tal objetivo levou a criação da *toolbox* Amiet Tools [5].

$$\begin{aligned} S_{\Delta p \Delta p'}(x_s, x'_s, y_s, y'_s, \omega) &= \lim_{T \rightarrow \infty} \left[\frac{\pi}{T} E \{ \Delta p(x_s, y_s, \omega) \Delta p^*(x'_s, y'_s, \omega) \} \right] \\ &= (2\pi\rho_0)^2 U_x \int_{-\infty}^{+\infty} \Phi_{ww}(k_x, k_y) g(x_s, k_x, k_y) g^*(x'_s, k_x, k_y) e^{-jk_y(y_s - y'_s)} dk_y \end{aligned} \quad (2)$$



5. DESENVOLVIMENTO DA FERRAMENTA

Antes de entrar nos detalhes do desenvolvimento da ferramenta desenvolvida, é importante informar que este artigo não apontará os nomes das rotinas, funções e classes criadas para a *toolbox*, visto que ela está em desenvolvimento contínuo e mudanças podem vir a ocorrer em etapas futuras. Estas podem alterar a estrutura atual dos códigos desenvolvidos, bem como, incluir outras *toolboxes* dentro do projeto atual. Posto isso, maiores detalhes sobre este conjunto de ferramentas podem ser encontradas na página do [GitHub](https://github.com/eac-ufsm/augen)⁷. Além disso, de modo a continuar a ter possibilidades integrativas de *software*, este *toolbox* em desenvolvimento será considerado um *módulo* do Beamap (em Python), sendo nomeado como **Augen**, acrônimo para “Amiet-Acoular Integration Module in Python”.

A integração das *toolboxes* apresentadas previamente neste trabalho necessita de algum tipo de conexão que permita, de maneira direta ou indireta, a utilização entre as ferramentas internas de cada *toolbox*. Logo, a criação desta *nova toolbox* é desejável, visto que ela permitirá o uso de resultados obtidos por uma ferramenta a serem utilizados nas outras — buscando ainda conectar funções, classes, entre outros. Sendo assim, a *toolbox* desenvolvida teve como base a linguagem de programação Python, junto ao paradigma de *programação orientada a objetos* [18] (POO)⁸. O emprego de tal paradigma é poderoso visto que proporciona o uso de objetos, os quais facilitam a

leitura dos códigos e sua criação, como também, auxiliam na representação de problemas reais de forma mais apurada (por exemplo, um objeto que representa um aerofólio e detém suas dimensões, entre outras informações), entre outras vantagens.

O desenvolvimento da ferramenta consistiu em criar uma conexão que permitisse uma ponte direta entre o Amiet Tools e Acoular, ao utilizar os dados de *vetor de direções* (*steering vector*) e a matriz de espectros cruzados (*Cross Spectral Matrix*, CSM), gerados com Amiet Tools, no Acoular. Além da possível aplicação de geometrias geradas com ITA-Toolbox e Beamap, salvas em formato XML⁹, o qual é utilizado pela *toolbox* Acoular. A Figura 3 ilustra de forma geral a integração entre as *toolboxes*.

Portanto, a ferramenta desenvolvida teve como objetivo principal a criação de classes e funções que permitissem um sistema automatizado e simples para geração das simulações do Amiet Tools, secundariamente, no armazenamento dos dados gerados em arquivos no formato de HDF5, bem como, na capacidade de acessar as informações armazenadas e na aplicação da técnica de *beamforming* com o Acoular.

A Figura 4 apresenta um diagrama do processamento interno que permite a integração das *toolboxes*. Inicialmente é realizada a entrada dos parâmetros no gerador de dados, sendo eles: as propriedades do escoamento turbulento; parâmetros acústicos para a simulação; frequências a serem simuladas; arranjo; distância do arranjo em

⁷Repositórios em <https://github.com/eac-ufsm/augen> e <https://github.com/eac-ufsm/fia2022-augen>.

⁸Ou também *Object-Oriented Programming* (OOP).

⁹O formato XML (*Extensible Markup Language*) é um dos formatos aprovados pela W3C, World Wide Web Consortium, a principal organização de padronização da Internet.

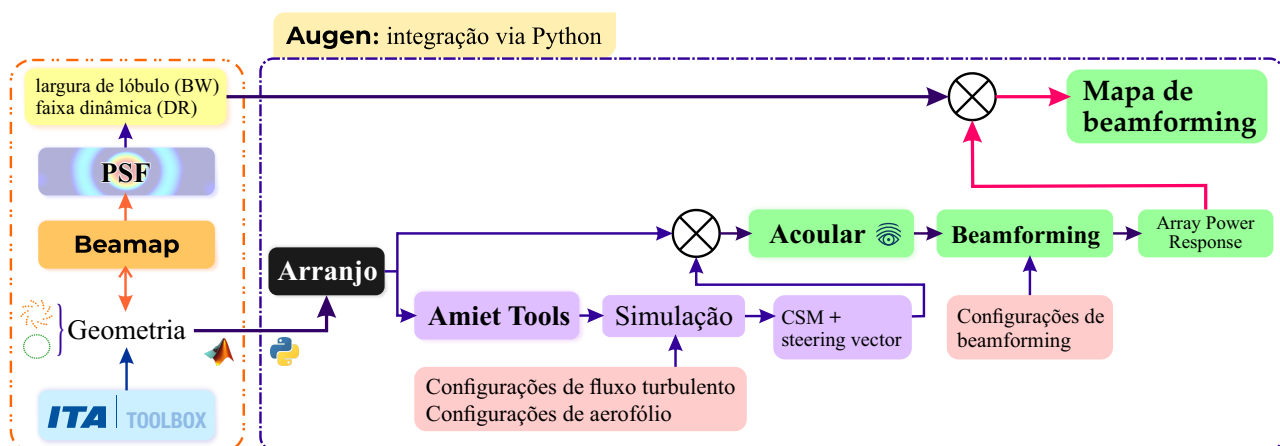


Figura 3: Diagrama com conexões e etapas da integração do Augen (Amiet Tools, Acoular, Beamap e ITA-Toolbox).

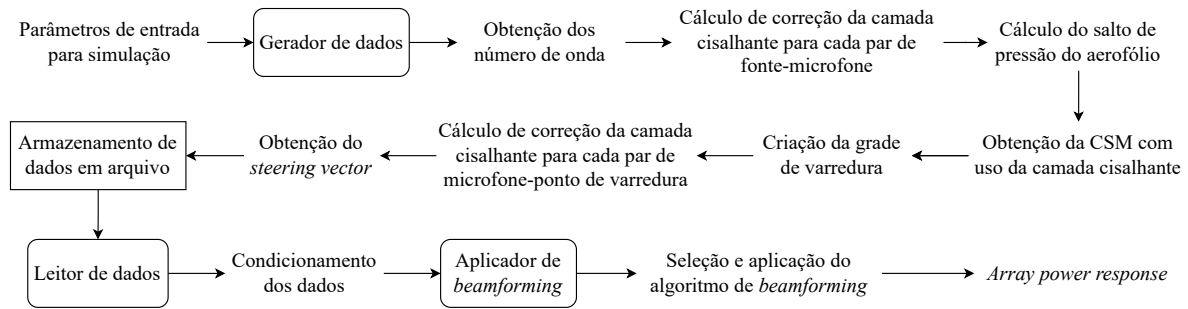


Figura 4: Diagrama de processamento da integração realizada pelo **Augen** entre Amiet Tools e Acoular.

relação ao aerofólio (necessário caso o arquivo do arranjo tenha as coordenadas dos microfones no eixo z igual a zero); tamanho da grade de varredura (*scanning grid*) e espaçamento entre pontos de varredura. Com a inserção dos dados no gerador, acontece uma pós-inicialização, na qual existe um pré-condicionamento de algumas entradas. Em seguida, ocorre o cálculo de correção da camada cisalhante para cada ponto discretizado do aerofólio em relação aos microfones do arranjo, em que obtêm-se os pontos de cruzamento e tempos de propagação — etapa a qual independe da frequência.

Prossegue-se então com a obtenção dos números de onda para a frequência em avaliação, seguido do cálculo de salto de pressão na superfície do aerofólio (o qual é necessário para que se possa obter a CSM), ao empregar a matriz que contém a correção da camada cisalhante para cada par de fonte-microfone. Em consequência, a grade com os pontos de varredura é criada, a fim de prosseguir-se com o cálculo de correção da camada cisalhante para cada par de microfone-ponto de varredura, o qual resultará na obtenção do *steering vector*, finalizando assim a simulação para uma dada frequência. Esse processo repete-se para cada uma das frequências a serem observadas.

Durante a simulação, o gerador irá salvar a cada etapa os dados necessários para a realização do imageamento, como também, dados que permitem a reprodutibilidade da simulação. Dentre os dados, encontram-se informações sobre: a geometria do aerofólio; os parâmetros acústicos da simulação e as propriedades do escoamento; arranjo utilizado; grade de varredura; e, por fim, e mais importante, os dados da CSM e do *steering vector* de cada frequência simulada.

Detendo-se do arquivo com os dados da simulação, procede-se com a sua leitura por meio de um

leitor que irá condicioná-los, a fim de serem utilizados pelo *aplicador de beamforming* (construído com base no Acoular). O aplicador permite a utilização de alguns dos algoritmos de *beamforming* disponíveis no Acoular, dentre eles estão: Beamforming Convencional (CB) [6, 7]; Capon [19]; MUSIC [20]; DAMAS [6] e Eigenvalues [21]. Logo após a seleção e aplicação do algoritmo desejado, o aplicador irá retornar uma matriz de níveis de pressão sonora, os quais foram normalizados pelo valor máximo da matriz de pressão (processo que ocorre internamente). Tal matriz permite a realização da criação do mapa de *beamforming*, fazendo ou não o uso do valor ideal para faixa dinâmica do arranjo — a qual pode ser obtida ao simular as *funções de espalhamento pontual* do arranjo.

Por fim, em relação à interação com as *toolboxes* disponíveis em Matlab, a *toolbox* Augen ainda oferece algumas funções (em Matlab) para salvamento e leitura de arranjos salvos em formato XML, como também, para armazenamento da *largura de lóbulo* (BW) e *faixa dinâmica* (DR) obtidos por uma simulação de PSFs de um arranjo qualquer, em arquivos do tipo HDF5.

6. RESULTADOS COMPUTACIONAIS

Esta seção a clara os resultados computais de *beamforming* obtidos por meio da integração das *toolboxes* previamente apresentadas, mais especificamente entre Acoular e Amiet Tools. Inicialmente são expostos os arranjos utilizados e suas características, seguido das configurações gerais para a realizar-se as simulações, então finalmente os resultados obtidos são apresentados.

Vale ressaltar que os resultados obtidos são para apresentar o funcionamento integrado das ferramentas e não buscam avaliar as diferenças entre as respostas obtidas dos arranjos selecionados, ou dentre os algoritmos de *beamforming* utilizados.



6.1 Arranjos simulados

Como o presente artigo avalia simulações computacionais, a construção física dos arranjos aqui desenvolvidos não será necessária. Dessa forma, os resultados obtidos fizeram o uso de dois tipos diferentes de arranjos, um com geometria espiral e outro com geometria circular.

Inicialmente foi utilizada a tese de Casagrande Hirono [17] como base, na qual o autor adotou a utilização de um arranjo em espiral de 36 microfones distribuídos em um diâmetro de 50 cm. Todavia, há o intuito de realizar uma ponte com as *toolboxes* Beamap e ITA-Toolbox projetando e avaliando arranjos diferentes daqueles empregados por Casagrande Hirono. Logo, adotou-se alguns limites baseados no arranjo do estudo original, limitando-se que os arranjos tenham um diâmetro máximo de 50 cm e um número 36 microfones no total.

O primeiro arranjo adotado foi em formato espiral, sendo que a geometria fora criada usando o Beamap (para Matlab). O arranjo possui 36 microfones os quais estão distribuídos em 4 círculos com 9 microfones cada, em que o primeiro círculo é localizado em um raio mínimo de 15 cm do centro do arranjo e o último círculo em um raio máximo de 25 cm (veja a Figura 5). O segundo é um arranjo de geometria circular com 36 microfones, tal arranjo fora gerado com o uso do ITA-Toolbox. Cada quadrante contém uma mesma quantidade de microfones (diâmetro de 50 cm).

Os arranjos foram simulados no Beamap, calculando as respectivas PSFs, e, em consequente, foram avaliados DR e BW para um ângulo de abertura de $33,55^\circ$ ($0,325 \text{ m} \times 0,325 \text{ m}$) e com plano focal $0,49 \text{ m}$ distante. Conhecer as faixas dinâmicas de cada arranjo permite utilizar os valores máximos de DR para observar as imagens acústicas, sem que haja efeitos causados pelos lóbulos laterais.

A Figura 5 apresenta DR e BW para a faixa de frequência de 1000 Hz até 8000 Hz, cobrindo as frequências em análise (para este artigo). Por fim, aclara-se que a escolha de tais arranjos deve-se ao fato de serem geometrias clássicas para imageamento acústico.

6.2 Configurações de simulação

Nesta seção serão apresentadas as configurações gerais adotadas para a realização das simulações que trazem a integração entre o Amiet Tools e o Acoular.

Inicialmente é vital definir qual arranjo utilizar, pois ele atuará como o observador do evento simulado (utilizou-se o uso dos dois arranjos supracitados). Para a realização da simulação posicionou-se os arranjos a uma distância de $-0,49 \text{ m}$ do aerofólio no eixo z , visto que o centro do aerofólio estará localizado em $(x, y, z) = (0, 0, 0) \text{ m}$. O plano de observação terá um tamanho de $0,65 \text{ m}$ para os eixos x e y . Além de que um espaçamento dos pontos da grade de varredura é de $0,01 \text{ m}$ para ambos os eixos. A Figura 6 ilustra essa situação tridimensionalmente.

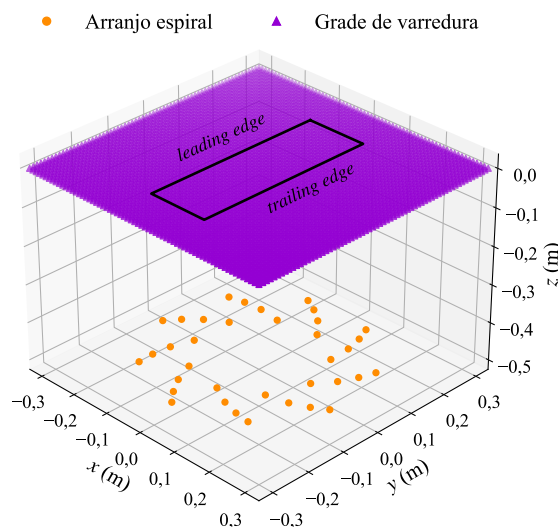


Figura 6: Esboço tridimensional apresentando o aerofólio com a grade de varredura que o envolve, além da relação de distância dele com o arranjo ($0,49 \text{ m}$).

Nas configurações necessárias para simular o ruído gerado no bordo de ataque de um aerofólio com o Amiet Tools é necessário dar uma entrada referente à geometria do aerofólio. Logo, o aerofólio aqui adotado possui uma semi-corda de $b = 0,075 \text{ m}$ e semi-envergadura de $d = 0,225 \text{ m}$, na qual o número de pontos para discretização da malha do aerofólio para a corda é de 100 pontos e da envergadura de 101 pontos.

A próxima etapa de configuração é relativa à acústica do problema e do escoamento turbulento, o qual o aerofólio estará submetido. Dentro dos parâmetros acústicos tem-se a velocidade do som c_0 estipulada como 340 m/s , a densi-

dade do ar $\rho_0 = 1,2 \text{ kg/m}^3$ e a pressão acústica de referência $p_{\text{ref}} = 20 \text{ }\mu\text{Pa}$. Para as propriedades do escoamento tem-se uma velocidade U_x de 60 m/s, uma intensidade de turbulência de $T_i = 0,025^{10}$, uma escala de comprimento de turbulência $\Lambda = 0,007 \text{ m}$ e, por fim, a altura da camada cisalhante $z_{\text{sl}} = -0,075 \text{ m}$.

Prosseguindo, com a utilização de todas essas configurações realizadas previamente, obter-se os valores de alguns parâmetros da simulação. Dentre os parâmetros para a propagação do escoamento no sentido de $+x$, tem-se o número de Mach $M_x = U_x/c_0 = 0,176$ e $\beta = \sqrt{1 - M_x^2} = 0,984$, conhecido como parâmetro de Prandtl-Glauert.

As frequências a serem observadas podem ser expressas por $f_0 = k_c c_0 / 2\pi(2b)$ considerando que $k_c = k_0(2b)$ é o número de onda normalizado pela corda, na qual $k_0 = 2\pi f_0 / c_0$ é o número de onda da frequência a ser observada. Logo, com $b = 0,075 \text{ m}$, $c_0 = 340 \text{ m/s}$ e $k_c = \{5, 10, 20\}$, as frequências obtidas serão: 1803,76 Hz; 3607,51 Hz e 7215,02 Hz.

É relevante informar que todas as frequências estão acima da frequência crítica f_{crit} , que define a região de transição entre as baixas e altas

frequências do problema [5]. Tal frequência pode ser obtida por meio de $f_{\text{crit}} = c_0 \beta / d$, obtendo-se $f_{\text{crit}} = 1486,97 \text{ Hz}$ para as condições estabelecidas anteriormente. O intuito de avaliar frequências acima da f_{crit} , sendo a primeira 1803,76 Hz, é de aproveitar-se da região de frequências com a faixa dinâmica mais “plana”, ou seja, a parte na qual os valores da DR não tendem a ter grandes variações. Note que para frequências abaixo da frequência crítica os valores de faixa dinâmica tendem crescer muito (veja a Figura 5), significando que a partir de uma certa frequência (observando em direção a 0 Hz) eventualmente existirá uma certa dificuldade em obter-se um valor concreto de faixa dinâmica, para a distância e ângulo de abertura adotados (ou seja, potencialmente não existem lóbulos laterais para a abertura considerada).

6.3 Resultados de beamforming

Após todas as configurações terem sido estabelecidas, as simulações usando Amiet Tools podem ser efetuadas, resultando na criação dos dados para serem utilizados pelo Acoular. Utilizando o novo conjunto de ferramentas desenvolvido durante este trabalho, o qual integra ambas as *toolboxes*, é possível gerar e empregar os dados simulados de forma simples, para uma obtenção

¹⁰ A intensidade de turbulência é uma propriedade adimensional, a qual pode ser obtida por meio da expressão $T_i = \sqrt{u_{\text{rms}}^2 / U_x^2}$, em que $u_{\text{rms}} = \bar{u}^2$ é a velocidade média quadrática do escoamento turbulento.

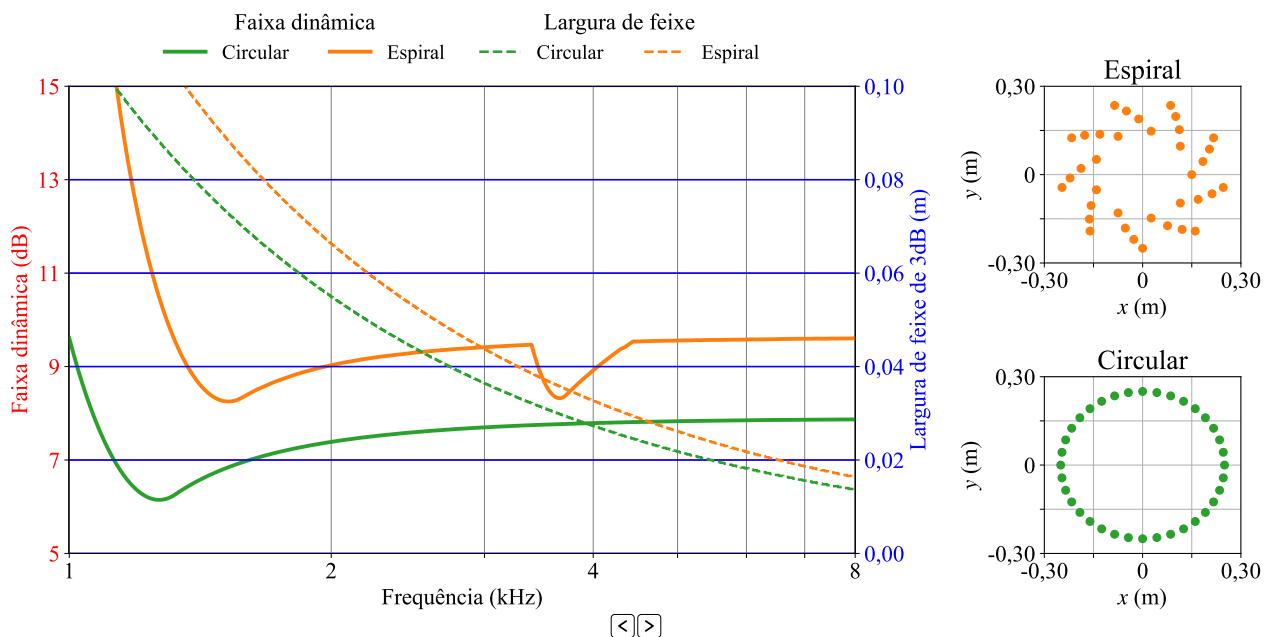


Figura 5: Resposta em frequência da faixa dinâmica (DR) e da largura de feixe (BW) de cada arranjo, para uma distância de 0,49 m da fonte pontual com um ângulo de abertura de 33,55° (0,325 m × 0,325 m). Respostas de (a) ambos arranjos (b) espiral e (c) circular (use as setas para navegar entre as figuras (a), (b) e (c).)



facilitada da *resposta de potência do arranjo*¹¹, a qual é aplicada na criação do mapa acústico.

Posto isto, a Figura 7 apresenta os resultados de *beamforming*, tanto para o arranjo em (a) espiral quanto para o (b) circular (*utilizar as setas para navegar entre as figuras*).

As figuras estão distribuídas em uma grade de 3 linhas por 3 colunas, na qual a 1ª linha apresenta as figuras geradas com uma implementação direta do algoritmo convencional — com a presença da diagonal principal, utilizando de forma direta os dados sintetizados pelo Amiet Tools. A 2ª e a 3ª linha expõem as figuras resultantes da integração (em que o imageamento é possível ao empregar o Acoular), em que a 2ª linha ainda

contém a diagonal principal e a 3ª linha detém a resposta com a remoção da diagonal. As colunas 1, 2 e 3 apresentam respectivamente os mapas para as frequências de 1803,76 Hz, 3607,51 Hz e 7215,02 Hz.

Ainda observando a Figura 7, é notável que as imagens (com a diagonal principal) geradas pela integração com Acoular são idênticas as da implementação direta do algoritmo de *beamforming* convencional, o que era esperado, visto que trata-se do mesmo algoritmo em ambos os casos.

Contudo, a diferença entre os resultados está no *back-end*, uma vez que a *toolbox* Acoular apresenta classes e funções para a utilização de diversos algoritmos *beamforming* com velocidade aprimorada, fidelidade e facilidade (como exemplo, tem-se justamente a remoção da diagonal princi-

¹¹ Termo conhecido em inglês como *array power response*.

Arranjo espiral

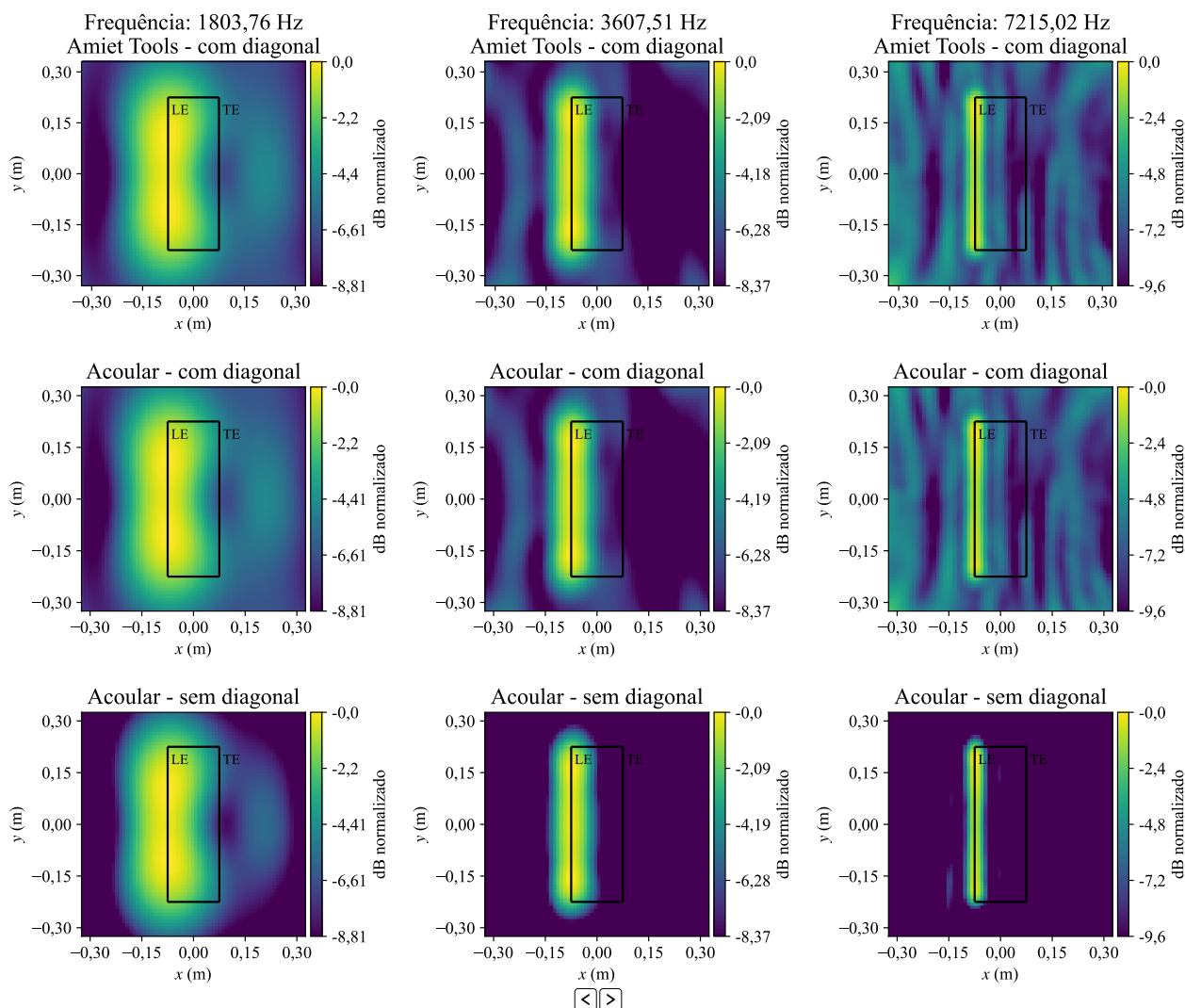


Figura 7: Resultados de *beamforming* (com Augen) para processamento via Acoular e Amiet Tools para arranjo (a) espiral, (b) circular e (c) espiral com processamento apenas via Acoular — ângulo de abertura 33,55° (0,325 m × 0,325 m) e distância do plano de medição de 0,49 m (*use as setas para navegar entre as figuras (a), (b) e (c)*).

pal). Ou seja, o usuário não terá a necessidade implementar tais ferramentas, apenas usufruindo das pré-existentes.

A vantagem de tal integração entre as *toolboxes* (via Augen) se dá pelo emprego das partes mais especializadas de cada uma (de maneira conjunta). Tal operação é possível, pois o Amiet Tools (ainda) não apresenta classes e funções especializadas para a aplicação do *beamforming* em si. Apresentando apenas o CB e funções correlatas à simulação da interação do aerofólio com um escoamento turbulento, da qual é possível extrair-se o *steering vector* e a CSM, as quais são utilizáveis pela *toolbox* Acoular.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho apresentou brevemente as *toolboxes* utilizadas como base (Beamap, Amiet Tools e Acoular), bem como, brevemente a teoria necessária para realização da integração, seguido de explicações acerca do desenvolvimento da ferramenta. Em consequente, finaliza com a apresentação de configurações e de simulações utilizadas para obtenção dos dados da CSM e do *steering vector*, a serem utilizados na criação dos resultados de *beamforming*.

O modelo computacional e de acesso livre da *toolbox* Amiet Tools, que fornece ferramentas para a aplicação do modelo de Amiet para ruído de interação turbulência-placa plana, foram a base fundamental para realização desta pesquisa¹².

A integração direta entre as duas principais *toolboxes* — Acoular e Amiet Tools — foi acessível de forma direta justamente pelo fato de que ambas foram desenvolvidas na mesma linguagem de programação (Python). Ademais, o processo integrativo consistiu na automatização da geração dos dados do Amiet Tools e seu condicionamento, para que fosse possível a aplicação deles no Acoular. Tal combinação ainda permitiu a utilização de arranjos gerados com as *toolboxes* em Matlab — Beamap e ITA-Toolbox — para serem aplicados nas simulações. Caso os arranjos tenham suas PSFs disponíveis (ao longo da frequência) para as configurações de simulação, é possível ainda usufruir das respectivas DRs, a fim de empregá-las

na criação dos mapas de *beamforming*.

Outro ponto importante a ser relatado é de que, como trata-se de um trabalho *em desenvolvimento*, os planos futuros para a ferramenta desenvolvida consistem em fornecer a possibilidade de integração direta dos conjuntos de ferramentas em Python e Matlab, ou seja, escrever em Python uma rotina (ou código) que empregue as funções e classes em escritas em Matlab e, vice-versa. Outros objetivos voltam-se para expandir a compatibilidade do projeto com outras *toolboxes*, além de melhorar as atuais integrações realizadas, buscando fornecer uma ferramenta com maior automação, simplicidade e versatilidade. Ademais, a pesquisa ainda objetiva, caso possível e necessário, ser capaz de poder contribuir futuramente com melhorias para as *toolboxes* que participaram do processo de integração.

Por fim, elucida-se que o Augen resulta em uma aplicação que facilita o uso da técnica de *beamforming* para área de aeroacústica — focada na teoria referente à simulação do ruído radiado no bordo de ataque de um aerofólio do tipo placa-plana. Ainda, no repositório [GitHub](#) encontra-se um pequeno tutorial de como instalar o pacote completo e de como simular alguns casos de exemplo.

8. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer todo o apoio e infraestrutura fornecido pelo curso de Engenharia Acústica e pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, Brasil).

In addition, the authors want to acknowledge all the Acoular developers, especially Prof. Ennes Sarradj and Dr.-Ing. Gert Herold for their support.

REFERÊNCIAS

- [1] Dietrich, Pascal; Guski, Martin; Pollow, Martin; Müller-Trapet, Markus; Masiero, Bruno; Scharrer, Roman e Vorlaender, Michael. ITA-Toolbox – An Open Source Matlab Toolbox for Acousticians. Em *38th German Annual Conference on Acoustics (DAGA)*, número 38, págs. 151–152, Darmstadt, Germany, 2012. Disponível em: https://pub.dega-akustik.de/DAGA_2012/data/articles/000164.pdf. *Toolbox* disponível em <https://git.rwth-aachen.de/ita/toolbox>.

¹²Integrando o grupo de pesquisa e um Projeto de Conclusão de Curso da Engenharia Acústica da UFSM.



- [2] Sarradj, Ennes e Herold, Gert. A Python framework for microphone array data processing (Acoular - Acoustic Testing and Source Mapping Software). *Applied Acoustics*, 116:50–58, 2017. ISSN 0003-682X. doi: [10.1016/j.apacoust.2016.09.015](https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.09.015). Disponível em: <http://acoular.org>.
- [3] Fonseca, William D’Andrea. *Beamforming considerando difração acústica em superfícies cilíndricas (Beamforming Considering Acoustic Diffraction over Cylindrical Surfaces)*. Tese de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/107608>.
- [4] Fonseca, William D’Andrea; Mareze, Paulo H.; Mello, Felipe R. e Fonseca, Carlos Calixto. Teaching Acoustical Beamforming via Active Learning Approach. Em *9th Berlin Beamforming Conference (BeBeC)*, número BeBeC-2022-D4, Berlim, Alemanha, junho 2022. Disponível em: <https://www.bebec.eu/fileadmin/bebec/downloads/bebec-2022/papers/BeBeC-2022-D04.pdf>.
- [5] Casagrande Hirono, Fabio; Joseph, Phillip e Fazi, Filippo M. An Open-Source Implementation of Analytical Turbulence-Airfoil Interaction Noise Model. Em *AIAA Aviation 2020 Forum*, número AIAA 2020-2544, págs. 1–21. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2020. doi: [10.2514/6.2020-2544](https://doi.org/10.2514/6.2020-2544).
- [6] Merino-Martínez, R.; Sijtsma, P.; Snellen, M.; Ahlefeldt, T.; Antoni, J.; Bahr, C. J.; Blacodon, D.; Ernst, D.; Finez, A.; Funke, S.; Geyer, T. F.; Haxter, S.; Herold, G.; Huang, X.; Humphreys, W. M.; Leclère, Q.; Malgoezar, A.; Michel, U.; Padois, T.; Pereira, A.; Picard, C.; Sarradj, E.; Siller, H.; Simons, D. G. e Spehr, C. A review of acoustic imaging methods using phased microphone arrays. *CEAS Aeronautical Journal*, 10(1):197–230, Mar 2019. ISSN 1869-5590. doi: [10.1007/s13272-019-00383-4](https://doi.org/10.1007/s13272-019-00383-4).
- [7] Sijtsma, Pieter. Experimental techniques for identification and characterisation of noise sources. Em *Advances in Aeronautics & Applications – VKI Lecture Series*, Rhode-Saint-Genève, Belgium, March 2004. Disponível em: <https://bit.ly/NLR-TP-2004-165>. Also in Netherlands Aerospace Centre (NLR) Technical Reports (NLR-TP-2004-165).
- [8] Johnson, D. H. e Dudgeon, D. E. *Array Signal Processing: Concepts and Techniques*. Prentice Hall PTR, Feb. 1993. ISBN 978-0130485137.
- [9] Wilson, Greg; Aruliah, D. A.; Brown, C. Titus; Chue Hong, Neil P.; Davis, Matt; Guy, Richard T.; Haddock, Steven H. D.; Huff, Kathryn D.; Mitchell, Ian M.; Plumbley, Mark D.; Waugh, Ben; White, Ethan P. e Wilson, Paul. Best practices for scientific computing. *PLOS Biology*, 12(1):1–7, 01 2014. doi: [10.1371/journal.pbio.1001745](https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1001745).
- [10] Brooks, Thomas F. e Humphreys, William M. A deconvolution approach for the mapping of acoustic sources (DAMAS) determined from phased microphone arrays. *Journal of Sound and Vibration*, 294(4):856–879, 2006. ISSN 0022-460X. doi: [10.1016/j.jsv.2005.12.046](https://doi.org/10.1016/j.jsv.2005.12.046).
- [11] Sijtsma, P. CLEAN based on spatial source coherence. *International Journal of Aeroacoustics*, 6:357–374, Dec. 2007. doi: [10.1260/147547207783359459](https://doi.org/10.1260/147547207783359459).
- [12] Ffowcs Williams, J. E.; Hawkings, D. L. e Lighthill, Michael James. Sound generation by turbulence and surfaces in arbitrary motion. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 264(1151):321–342, 1969. doi: [10.1098/rsta.1969.0031](https://doi.org/10.1098/rsta.1969.0031).
- [13] Amiet, R. K. Acoustic radiation from an airfoil in a turbulent stream. *Journal of Sound and Vibration*, 41(4):407–420, 1975. ISSN 0022-460X. doi: [10.1016/S0022-460X\(75\)80105-2](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(75)80105-2).
- [14] Santana, Leandro Dantas. *Semi-analytical Methodologies for Airfoil Noise Prediction*. Tese de doutorado, Katholieke Universiteit Leuven, Leuven, Belgium, 2015. Disponível em: <https://lirias.kuleuven.be/retrieve/332128>.
- [15] Wolf, William e Fuzaro Miotto, Renato. *Fundamentos de Aeroacústica*, volume 10, chapter 3. ABCM, São José dos Campos, SP, 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/317643600_Fundamentos_de_Aeroacustica.
- [16] Casagrande Hirono, Fabio; Joseph, Phillip e Fazi, Filippo. Aerofoil source estimation from nearfield array measurements. Em *23rd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*. American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA), 2017. doi: [10.2514/6.2017-4178](https://doi.org/10.2514/6.2017-4178).
- [17] Casagrande Hirono, Fabio. *Far-Field Microphone Array Techniques for Acoustic Characterisation of Aerofoils*. Tese de doutorado, University of Southampton, Southampton, United Kingdom, 2018. Disponível em: <https://eprints.soton.ac.uk/455962/>.
- [18] Sebesta, Robert W. *Concepts of Programming Languages*. 12^a ed. New York: Pearson, 2019. ISBN 978-0134997186.
- [19] Capon, J. High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis. *Proceedings of the IEEE*, 57(8):1408–1418, 1969. doi: [10.1109/PROC.1969.7278](https://doi.org/10.1109/PROC.1969.7278).
- [20] Schmidt, R. Multiple emitter location and signal parameter estimation. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 34(3):276–280, 1986. doi: [10.1109/TAP.1986.1143830](https://doi.org/10.1109/TAP.1986.1143830).
- [21] Sarradj, E; Schulze, C e Zeibig, A. Identification of noise source mechanisms using orthogonal beamforming. Em *International Congress on Noise and Vibration Emerging Methods (NOVEM 2005)*, Saint-Raphael, France, 2005. Disponível em: https://www-docs.b-tu.de/fg-akustik/public/veroeffentlichungen/sarradj_orthogonal_novem2005.pdf.