

FIA 2020/22

XII CONGRESSO/CONGRESO IBEROAMERICANO DE ACÚSTICA

XXIX ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA - SOBRAC

Florianópolis, SC, Brasil

Construção de um protótipo simplificado de fonte sonora rotativa e medição utilizando princípios da norma IEC 61400-11 e imageamento sonoro via beamforming

Sanchez, T. M.¹; Fonseca, W. D'A.¹; Mello, F. R.¹; Mareze, P. H.¹; Melo, V. S. G.¹

¹ Engenharia Acústica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil,
{thiago.sanchez, will.fonseca, felipe.mello, paulo.mareze, viviane.melo}@eac.ufsm.br

Resumo

A geração de energia a partir de turbinas eólicas tem crescido em todo o mundo, apresentando novos desafios no que diz respeito a paisagem sonora ao seu redor. Nesse sentido, normas e legislações foram criadas para regulamentar a instalação de aerogeradores, prezando pela saúde dos que vivem próximo a usinas. De 2015 a 2019, esteve em vigor no Brasil a Portaria Inmetro-MDIC nº 168 (de 23/03/2015), que versava sobre “Requisitos de avaliação da conformidade para aerogeradores”, incluindo pormenores da parte elétrica e acústica. Esse documento, no que concerne à acústica, apontava para os requisitos da norma internacional IEC 61400 – *Wind turbine generator systems – Part 11: Acoustic noise measurement techniques*. Este trabalho tem como objetivo apresentar um estudo simplificado da IEC 61400. Para isso, construiu-se um protótipo rotativo em escala, no qual a geração sonora é realizada por meio de dois alto-falantes sem fio posicionados de forma axissimétrica nas pás da hélice, as quais são rotacionadas por um motor DC controlado por Arduino via Matlab. A emissão de ruído do protótipo foi avaliada seguindo as diretrizes da norma IEC e estudos de imageamento acústico foram realizados, buscando comparar as técnicas para focos fixo, móvel e janelamento temporal. Para tal, utilizou-se o toolbox Beamap (foco fixo e resultados janelados), do curso de Engenharia Acústica da UFSM, em conjunto com o Acoular (resultados dinâmicos), desenvolvido pela Universidade Técnica de Berlim. Ao fim, foi possível aplicar os princípios dos métodos da norma com sucesso, bem como demonstrar a eficácia dos algoritmos de imageamento baseados em foco móvel (via comparação com os algoritmos de foco fixo).

Palavras-chave: aerogeradores, ruído, Acoular, Beamap, Arduino, imageamento acústico, arranjo, microfones.

PACS: 43.35.Sx, 43.60.–c, 43.58.–e, 43.28.–g, 43.60.Lq.

Construction of a simplified rotating sound source prototype, and measurement using principles of the standard IEC 61400-11 and acoustic imaging via beamforming

Abstract

Power generation through wind turbines has been increasing worldwide, leading to new challenges regarding their surrounding soundscapes. In this sense, standards and legislations were created to rule the installation of wind turbines, accounting for the well-being of people living in their neighborhoods. From 2015 to 2019, the Ordinance Inmetro-MDIC nº168 (from 23/05/2105) was operative, which spoke about the “requirements for conformity evaluation of wind generators” including details on their electrical and acoustic parameters. Concerning the acoustics part, the document pointed to requirements of the international standard IEC 61400 – *Wind turbine generator systems – Part 11: Acoustic noise measurement techniques*. This work aims to show a simplified study of the IEC 61400. Thereunto, a scaled rotative prototype was built. Its sound generation was carried out by two wireless loudspeakers axisymmetric positioned on the blades, which were moved by a DC motor controlled by an Arduino via Matlab. The prototype’s noise emission was evaluated following the IEC guidelines. In addition, acoustic imaging studies were carried out to compare techniques involving fixed and moving focus, along with time-windowing. To that, UFSM’s Acoustical Engineering Beamap toolbox was used (fixed focus and time-windowing), along with Acoular (dynamic results), developed at the Technical University of Berlin. Ultimately, the principles of the standard’s methods were successfully applied. Moreover, it was possible to show the effectiveness of moving focus acoustical imaging algorithms (via comparison against fixed focus algorithms).

Keywords: wind turbines, noise, Acoular, Beamap, Arduino, acoustic imaging, array, microphones.



1. INTRODUÇÃO

O uso de geradores eólicos tem crescido em todo o mundo [1]. O Brasil já é o sétimo país do mundo em capacidade instalada de energia eólica, assistindo mais de 86 milhões de pessoas por meio de aerogeradores todos os meses [2]. A Portaria Inmetro-MDIC nº 168 (de 23/03/2015), em vigor no Brasil de 2015 a 2019, versava sobre *Requisitos de avaliação da conformidade para aerogeradores* e, para isso, citava a norma internacional IEC 61400-11:2002 – *Acoustic noise measurement techniques*, que traz diretrizes para medições de turbinas eólicas, de forma a caracterizar parâmetros confiáveis para que a operação dessas fontes de energia renováveis estejam dentro de limites aceitáveis do ponto de vista acústico.

Nesse sentido, a fim de realizar uma pesquisa¹ no tema (de medição de aerogeradores) e aprofundar o aprendizado em *imageamento acústico* para tais fontes, construiu-se um protótipo simplificado de fonte sonora rotativa (de 50 cm de altura) para simular uma pequena turbina eólica. A rotação das pás foi feita por meio de um motor DC controlado via Arduino e Matlab.

A primeira parte do trabalho consistiu-se em utilizar princípios da norma IEC 61400-11 para obter medições acústicas similares às suas diretrizes, utilizando uma interface de áudio e microfones de eletreto. Os microfones foram devidamente calibrados e os resultados mostram os níveis de pressão sonora (NPS) equivalentes. A segunda parte do trabalho teve como base a técnica de *beamforming*, no intuito de localizar fontes sonoras em movimento circular (rotativo). Neste caso, as fontes sonoras foram pequenos alto-falantes

bluetooth colocados nas extremidades das pás do protótipo de madeira. O trabalho completo, com todas as análises e discussões, pode ser encontrado na monografia de Sanchez [3]. A Figura 1 mostra de forma simplificada as etapas seguidas neste trabalho.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta seção contém fundamentos necessários tanto para a medição segundo a norma IEC 61400-11:2002 (Seção 2.1) quanto para o *beamforming* (Seção 2.2).

2.1 Norma IEC 61400-11:2002

A IEC (*International Electrotechnical Commission*) é uma organização mundial de padronização. O objetivo da IEC é promover a cooperação internacional em todas as questões relativas à padronização nos campos elétricos e eletrônicos. A entidade colabora estreitamente com a Organização Internacional de Normalização (ISO), conforme as condições determinadas por acordo entre as duas organizações [4].

O objetivo da IEC 61400-11:2002 é fornecer uma metodologia uniforme que assegure consistência na medição e análise de emissões acústicas por sistemas de geradores eólicos (*wind turbines*), permitindo a caracterização das suas emissões de ruído [4]. De acordo com a norma, pelo menos uma — ou opcionalmente outras três — posição de microfone deve ser usada para medir ruído (em determinadas situações de operação). As quatro posições de microfones devem ser dispostas em um padrão ao redor da turbina eólica conforme indicado na Figura 2 (a).

A distância de referência R_0 para turbinas de eixo

¹O presente artigo é fruto da monografia de conclusão de curso do primeiro autor [3].



Figura 1: Diagrama-resumo deste trabalho.

horizontal é dada por:

$$R_0 = H + \frac{D}{2}, \quad (1)$$

em que H corresponde a distância vertical entre o chão e o centro do rotor e D é o diâmetro do rotor. O cálculo de R_0 tem uma tolerância de 20% e deve ser medido com uma precisão de 2%. A Figura 2 (b) mostra visualmente as distâncias R_0 , H e D .

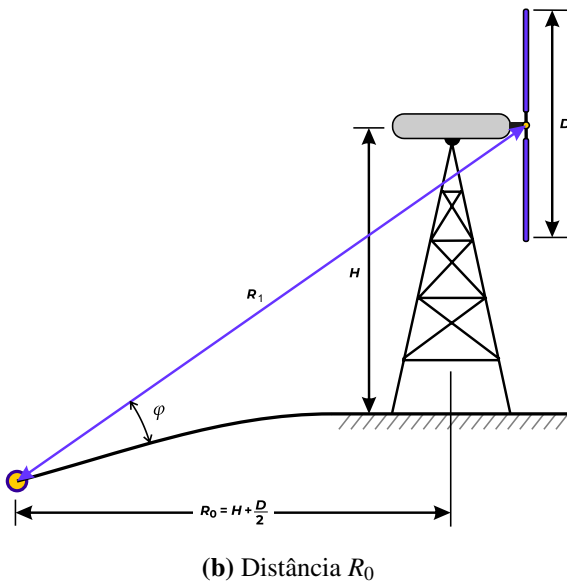
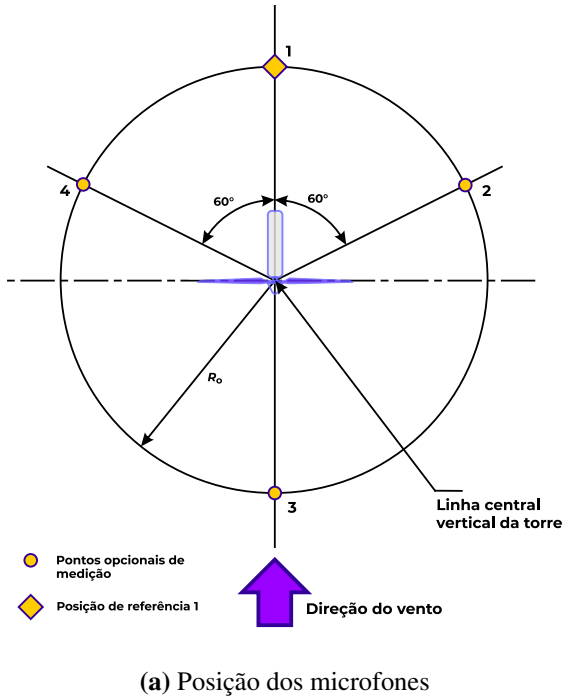


Figura 2: Posições de medição dos microfones e ilustração da distância R_0 para turbinas eólicas horizontais (adaptado da IEC 61400-11:2002 [4]).

2.2 Beamforming

Beamforming é uma técnica de filtragem espacial baseada em arranjos de sensores. Em acústica, a técnica é utilizada para localização de fontes sonoras no espaço, bem como seu mapeamento em *imagens acústicas*. O princípio se baseia na adição coerente de sinais de uma determinada direção (ou ponto no espaço), rejeitando sinais provenientes de outras direções [5].

Devido a sua robustez, a técnica possibilita a utilização de microfones de custo reduzido (eletreto), permitindo medições satisfatórias tanto em campo acústico semipróximo quanto em campo distante — em contraponto às técnicas como holografia e intensidade acústica [6]. Todavia, cabe ressaltar que o *beamforming* possui limitações em baixas frequências sobretudo devido à geometria do arranjo e à quantidade de sensores, o que faz com que a técnica seja eficiente para medições em médias e altas frequências [6].

2.2.1 Beamforming clássico

O *beamforming clássico*, também conhecido por *atraso-e-soma*², é o mais simples da família de algoritmos de *beamforming* [7]. Como o próprio nome diz, ele mapeia as fontes sonoras utilizando-se da diferença de tempo entre as frentes de onda sonoras que atingem os sensores do arranjo.

O algoritmo consiste em dividir um plano de análise (no espaço) em N células, formando uma malha (ou um *grid* de varredura). Na sequência, calcula-se os atrasos Δ_m entre o n -ésimo ponto da malha e o m -ésimo sensor do arranjo, proporcionais ao tempo que a onda sonora advinda do n -ésimo ponto leva para chegar ao m -ésimo microfone. Assim, virtualmente, é como se todos os sinais oriundos de um mesmo ponto chagassem simultaneamente em todos os sensores do arranjo.

Após a aplicação do atraso em todos os sinais, estes são somados e divididos pelo número total de sensores M . Ademais, aplica-se uma ponderação por um fator w_m , de modo a compensar o espalhamento esférico das ondas durante a propagação. Matematicamente, o processo pode ser descrito

²Do inglês *delay-and-sum* ou DAS ou ainda DSB.



por

$$b(t) = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M w_m p_m(t - \Delta_m), \quad (2)$$

em que p_m é a função que descreve o sinal do m -ésimo microfone no instante de tempo t .

Ao fim, o algoritmo atribui valores de acordo com o resultado da soma dos sinais para cada ponto n da malha, sendo apresentados em um mapa de cores. Um valor baixo atribuído corresponderá, visualmente, a uma cor mais fria e um valor maior corresponderá a uma cor mais quente — claro, isso também dependerá da escala de cores escolhida.

2.2.2 Beamforming convencional

Quando o histórico temporal não é necessário, a técnica do *beamforming convencional* (CB) pode ser utilizada, pois baseia-se no domínio da frequência. Geralmente o tempo de computação é acelerado devido à utilização de processamento com notação matricial. A expressão final para essa formulação é

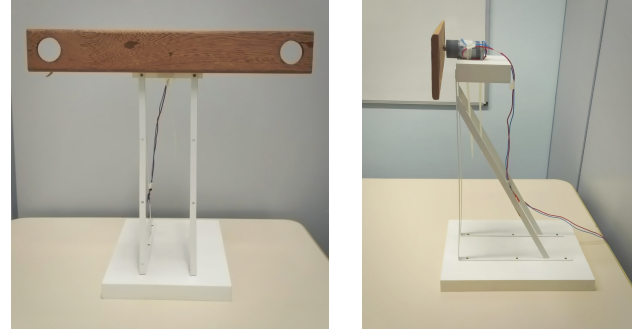
$$|B(f)|^2 = \frac{\vec{g}^\dagger \vec{C} \vec{g}}{|\vec{g}|^4}, \quad (3)$$

em que $\vec{g}$ é o vetor de direções; $\vec{C}$ é a matriz de espectros cruzados e $\{\cdot\}^\dagger$ simboliza o Operador Hermitiano — pormenores podem ser encontrados em Fonseca [8] e Sijtsma [9].

3. ASPECTOS CONSTRUTIVOS

Uma vez que nesta pesquisa não foi possível ter acesso a um aerogerador real, fez-se necessário construir um protótipo simplificado, de forma a possibilitar os experimentos e a realização deste trabalho, veja a Figura 3.

A base da estrutura foi feita com uma placa de madeira tipo MDF (*fibra de média densidade*), com arestas 40 cm × 30 cm × 38 mm. Sobre ela foram fixadas duas cantoneiras tipo mão-francesa e, no topo, foi parafusada uma outra placa de MDF (16 cm × 12 cm × 38 mm). Nesta placa menor foi apoiado e fixado o motor DC, responsável pela movimentação de uma terceira placa de MDF, esta retangular, com dimensões de 60 × 10 cm, simulando a pá de uma turbina eólica. As extremidades da pá foram furadas com uma serra copo (25 cm distantes do eixo), de forma a per-



(a) Visão frontal

(b) Visão lateral

Figura 3: Protótipo final construído.

mitir o acoplamento dos pequenos alto-falantes *bluetooth*.

Finalmente, o acionamento do motor foi realizado por meio de um Arduino Due conectado a um computador e controlado via Matlab (veja o Apêndice A deste artigo).

4. DESENVOLVIMENTO

Esta seção dedica-se a apresentar a instrumentação e procedimentos para os experimentos propostos. Especificamente, a Seção 4.1 contém detalhes acerca da bancada para medições de NPS em concordância com princípios da norma IEC 61400-11:2002. É importante deixar claro que esta pesquisa não atendeu as medições e processamentos da norma em sua totalidade, pois eles dependem do regime de funcionamento do aerogerador. A Seção 4.2 relata a escolha da geometria do arranjo, suas simulações realizadas com os *software* Beamap e Acoular e, ao fim, descreve o experimento de *beamforming*.

4.1 Experimento 1 – Medições IEC

Para este primeiro experimento, foram usados os seguintes equipamentos:

- interface Presonus AudioBox 1818VSL;
- calibrador de pressão B&K Type 4231;
- 4 × microfones Panasonic WM-61A;
- Arduino Due; e
- computador.

O diagrama de blocos das conexões é mostrado na Figura 4.

Para a medição do protótipo, as posições dos quatro microfones respeitaram as distâncias estabelecidas pela Equação (1) e a Figura 2, veja também

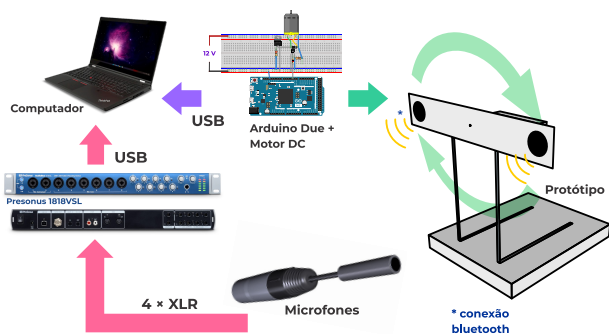


Figura 4: Conexões para o experimento utilizando a norma IEC 61400-11.

a Figura 5. A sala utilizada para a medição foi o Estúdio SAB da UFSM. Essa sala possui tratamento acústico para médias e altas frequências, com materiais fonoabsorventes. Ainda assim, a sala não é ideal (campo livre), todavia, foi a melhor opção acessível.

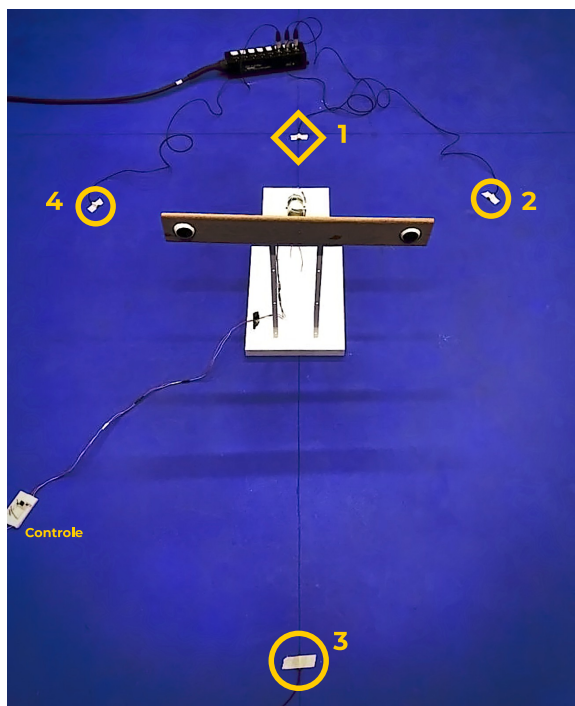


Figura 5: Bancada de medição com protótipo e microfones.

O envio dos sinais (ruído branco) para os alto-falantes foi realizado via conexão *bluetooth*, de forma a facilitar a medição. O controle do motor foi realizado via Matlab, uma velocidade aproximadamente constante era definida (115 rpm). A aquisição dos dados foi realizada também via Matlab (com ITA-Toolbox [10]). Os quatro microfones foram calibrados, tanto antes quanto depois das medições. Foram realizadas 30 medições utilizando ruído branco e 5 medições do ruído de fundo com o protótipo desligado.

A Figura 5 ilustra o protótipo com os microfones em volta e os alto-falantes acoplados, bem como o circuito de controle ao lado.

4.2 Experimento 2 – Beamforming

O segundo experimento consistiu em algumas etapas. Primeiramente, foi necessário definir a geometria do arranjo que seria utilizado nas medições. Para isso, recorreu-se à recomendações encontradas na literatura, como explicitado na Seção 4.2.1. As geometrias escolhidas foram, então, simuladas utilizando as ferramentas Beamap e Acoular, apresentadas na Seção 4.2.2. Em seguida, com o *setup* experimental descrito na Seção 4.2.3, mediu-se uma fonte pontual alinhada ao centro do arranjo, a qual foi utilizada para comparação com as simulações e validação da bancada (vide resultados na Seção 6.1). Finalmente, com o sistema validado, mediu-se o protótipo em movimento rotativo.

4.2.1 Escolha da geometria do arranjo

Existem diversas geometrias aplicáveis para medições de *beamforming*. Em geral, elas são classificadas de acordo com sua dimensionalidade (1D, 2D ou 3D) e de acordo com sua transparência acústica [8]. Para uma medição face a face com fontes rotativas que estão alinhadas axialmente com o arranjo, a literatura recomenda predominantemente arranjos circulares [11, 12], dado seu ótimo desempenho³, o que pode ser observado também em outras referências [14–18], embora seja também relatado o uso satisfatório de arranjos espirais ou de formato arbitrário [19–21].

Para o experimento, optou-se por utilizar *geometrias circulares* com dois valores de raio (para testes distintos), conforme mostrado na Figura 6⁴. Essa escolha está relacionada com o processamento de rotacioná-la virtualmente para que a posição relativa entre arranjo e fontes seja praticamente estacionária — técnica disponível no Acoular. Ademais, recentemente Zhang *et al.* [22] publicou uma técnica aprimorada com grande potencial de acelerar o cálculo de arranjos circulares, o que será investigado no futuro.

³Em comparação às configurações do tipo cruz ou linear, por exemplo. Um interessante material sobre geometrias pode ser consultado no texto de Christensen e Hald [13].

⁴É importante pontuar que, devido ao *grid* que sustenta todos os microfones, foi necessário alguns ajustes na geometria, o que justifica a disposição não-equidistante dos 32 sensores.

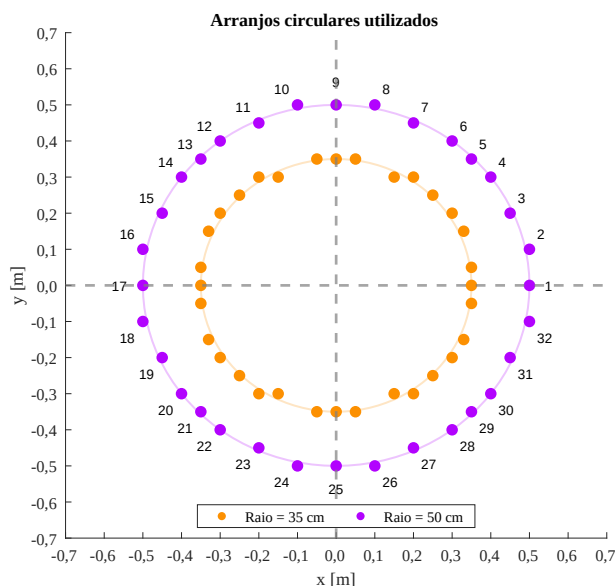


Figura 6: Arranjos de 0,35 m (laranja) e 0,50 m (roxo) de raio escolhidos para o experimento.

4.2.2 Ferramentas para simulação e processamento

Com o objetivo de validar a resposta dos arranjos propostos, bem como processar os dados obtidos experimentalmente, utilizou-se as ferramentas presentes nas *toolboxes* Beamap [23] e Acoular [24] (veja o diagrama-resumo de processamento⁵ na Figura 7).

Para as simulações e validação do *setup* experimental, utilizou-se da *caixa de ferramentas Beamap*, desenvolvida em Matlab pelo grupo de pesquisa em imagens acústicas da EAC-UFSM [23]. Esse pacote contém códigos de processamento de *beamforming* clássico e convencional para fontes estacionárias, calculando parâmetros como *Point Spread Function* (PSF), *faixa dinâmica* (DR ou *Dynamic Range*) e *largura de lóbulo* (BW ou *Beamwidth*). Além disso, permite gerar e avaliar geometrias virtuais, bem como processar dados reais obtidos experimentalmente. Com essa ferramenta, realizou-se a validação do experimento comparando a medição de uma fonte fixa (posicionada a uma distância de dois metros do arranjo e alinhada com seu centro) com os dados simulados. Os resultados da validação encontram-se na Seção 6.1.

⁵A aquisição de sinais foi realizada via ITA-Toolbox (no Matlab), de modo que o arquivo é nativamente aceito no Beamap. Para importação no Acoular, um pequeno código foi criado. Esses códigos estão disponíveis no repositório do [GitHub](#).

Na etapa de pós-processamento das medições com fonte em movimento (protótipo), utilizou-se da *caixa de ferramentas* Acoular, escrito na linguagem Python e desenvolvido Universidade Técnica de Berlim [24]. O pacote conta com diversos algoritmos que podem ser utilizados tanto no domínio do tempo quanto na frequência, gerando imagens acústicas a partir de dados medidos por um arranjo de microfones. A vantagem desse pacote, além dos diversos algoritmos disponíveis, é a possibilidade de processamento não só para fontes estacionárias, mas também para fontes em movimento axial rotativo. Os resultados obtidos podem ser verificados na Seção 6.2. Um trabalho aprofundado sobre arranjos circulares pode ser encontrado na tese de Herold [25].

4.2.3 Experimento com beamforming

A etapa experimental foi realizada no Estúdio SAB da UFSM. Utilizou-se os seguintes equipamentos:

- interface de áudio RME Digiface USB;
- 4 × conversores ADA8000 Behringer;
- 32 × microfones Panasonic WM-61A;
- 4 × *medusas* para conexão de cabos;
- alto-falante X-Mini; e
- computador.

O diagrama de blocos de todo o sistema é mostrado na Figura 8.

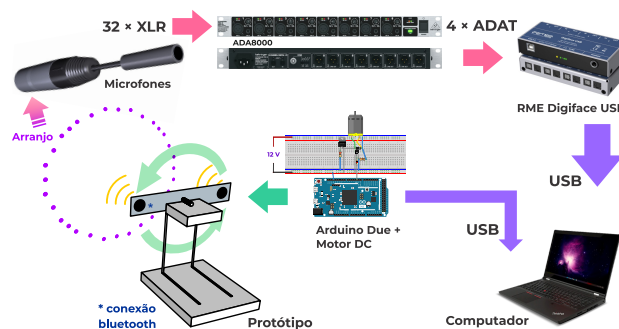


Figura 8: Conexões para o experimento utilizando a técnica de *beamforming*.

Os 32 microfones foram posicionados no arranjo (*grid* de metal) com a ajuda de peças acopladoras, o que pode ser visto na Figura 9.

Os microfones foram conectados via quatro *medusas*, responsáveis por levar os sinais aos quatro conversores ADCs. Estes, por sua vez, se conectam ao computador por meio da placa RME.

O protótipo foi medido a dois metros dos arranjos. Para o alinhamento do eixo com o centro dos arranjos, o protótipo foi apoiado, de forma que sua altura foi de 1,25 m do piso — a Figura 9 (b) mostra a configuração.

5. RESULTADOS PARA MEDIÇÃO SEGUNDO A NORMA IEC

Os dados apresentados nesta seção contemplam apenas alguns resultados selecionados, o trabalho completo pode ser conferido em Sanchez [3]. Ademais, é importante ressaltar que aplicou-se algumas simplificações no processamento. Assim, com relação às medições, foram feitas as filtragens dos sinais em banda de terço de oitava tanto para as trinta medições (de ruído branco) quanto para as cinco medições de ruído de fundo. Por fim, foram realizadas médias equivalentes para todos os sinais (de cada microfone).

A Figura 10 apresenta os resultados em $1/3$ e $1/1$

de oitava, sem ponderação, para os quatro microfones utilizados. É possível observar valores mais elevados para o Microfone 3, uma vez que este foi colocado logo à frente do protótipo, enquanto os Microfones 2 e 4 foram colocados a 60 graus e o Microfone 1, de referência, atrás do dispositivo.

6. RESULTADOS DO IMAGEAMENTO

Nesta seção são apresentados os resultados de validação do arranjo (utilizando Beamap, Seção 6.1) e da medição com o protótipo (utilizando Acoular, Seção 6.2).

6.1 Resultados para validação do arranjo

Primeiramente, a fim de averiguar a confiabilidade do experimento, foi medido um mini alto-falante X-Mini. Com isso, pôde-se comparar as respostas dos arranjos medidas com as simuladas (PSFs) no Matlab (de acordo com o apresentado na Seção 4.2.2). A Figura 11 mostra uma compa-

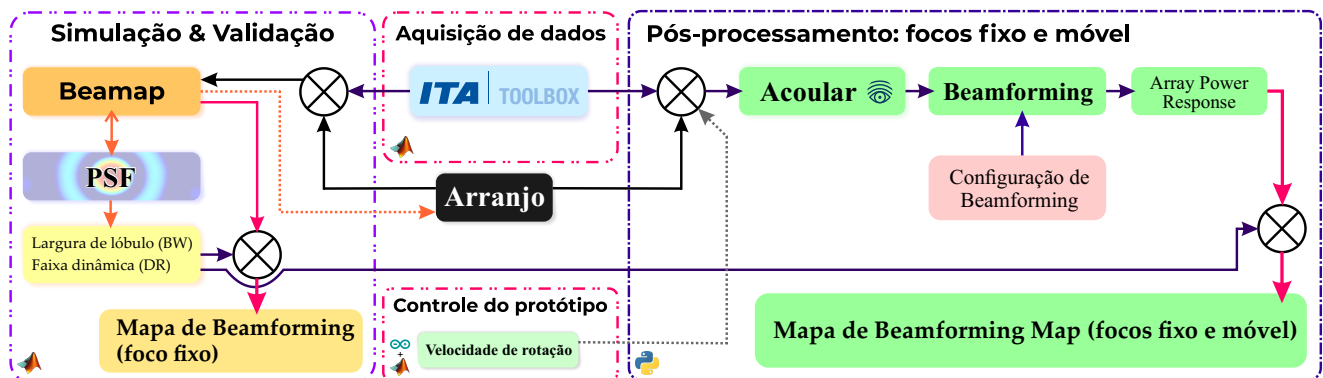
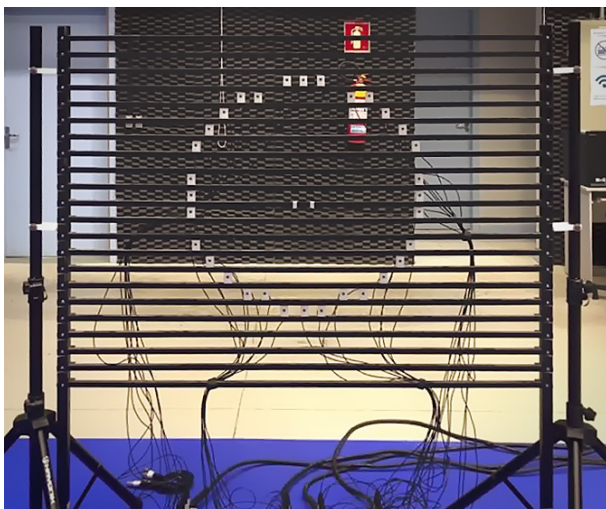


Figura 7: Fluxo de dados no processamento de *beamforming*.

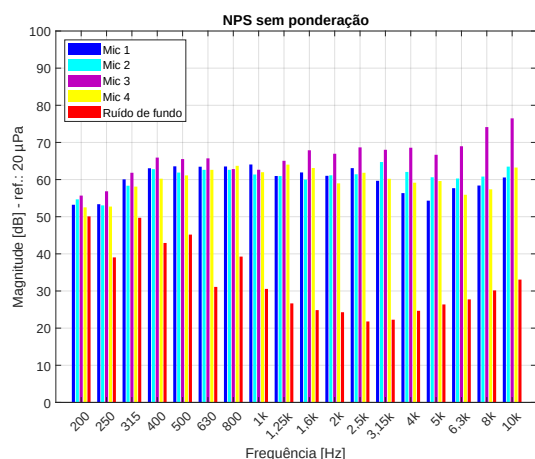


(a) Arranjo de microfones (0,35 m).

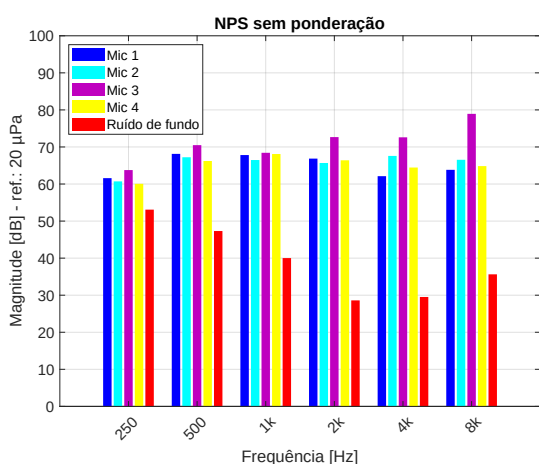


(b) Medição utilizando o protótipo para a geometria circular de raio 0,50 m.

Figura 9: Fotos do *setup* de medição experimental com arranjo de microfones (no Estúdio SAB da UFSM).



(a) Terço de oitava



(b) Oitava

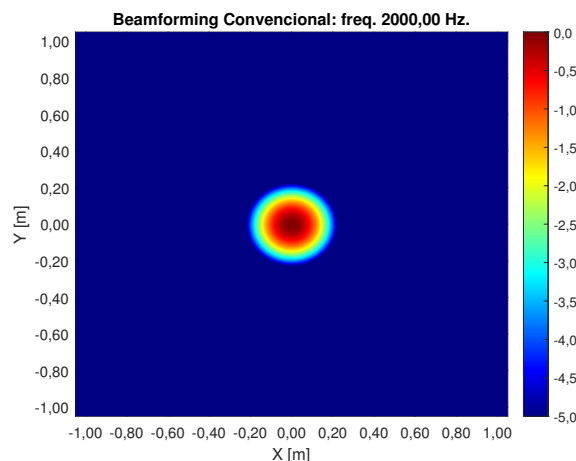
Figura 10: Gráfico comparativo entre os quatro microfones (da medição da IEC 61400-11) em terço e oitava.

ração entre os mapas de *beamforming* teórico e experimental para o arranjo de raio 0,35 m, com a fonte a dois metros do arranjo (alinhada com o centro), considerando uma faixa dinâmica de 5 dB.

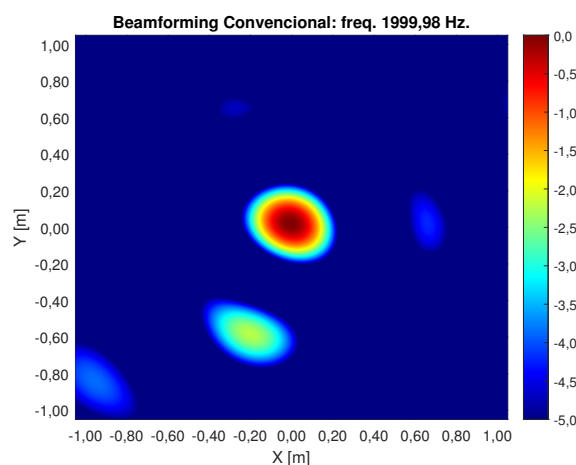
No resultado teórico, como esperado, apenas a fonte é mostrada, pois a diferença entre o lóbulo lateral mais próximo é de aproximadamente 7 dB. Todavia, é possível perceber no resultado experimental a presença de lóbulos laterais espúrios, que são provavelmente reflexões da sala.

6.2 Resultados para fontes em movimento

Como no caso da fonte fixa, as medições das fontes móveis foram realizadas com o protótipo a dois metros de distância do arranjo, com seu centro alinhado ao centro do rotor. Para melhor



(a) Teórico 2 kHz



(b) Experimental 2 kHz

Figura 11: Comparação dos mapas teórico e experimental para arranjo de raio 0,35 m a dois metros da fonte, com abertura de 27,70° e faixa dinâmica de 5 dB.

visualização dos resultados, utilizou-se apenas a parte dos sinais referente a uma volta, o que corresponde a aproximadamente 0,52 segundos de medição (ou 23000 amostras), considerando a rotação das pás de 115 rpm. A Figura 12 mostra as quatro análises realizadas.

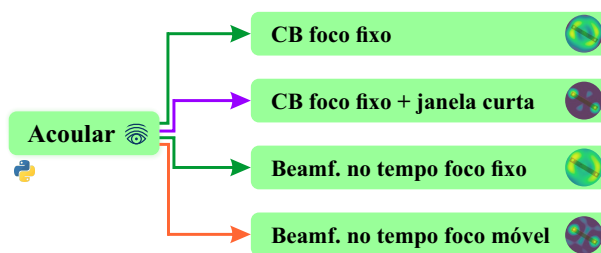


Figura 12: Quatro análises realizadas no Acoular.

Primeiramente, as medições foram processadas utilizando CB (na frequência, foco fixo), Figuras 13 (a), 13 (b) e 13 (c). Dessa forma, como as

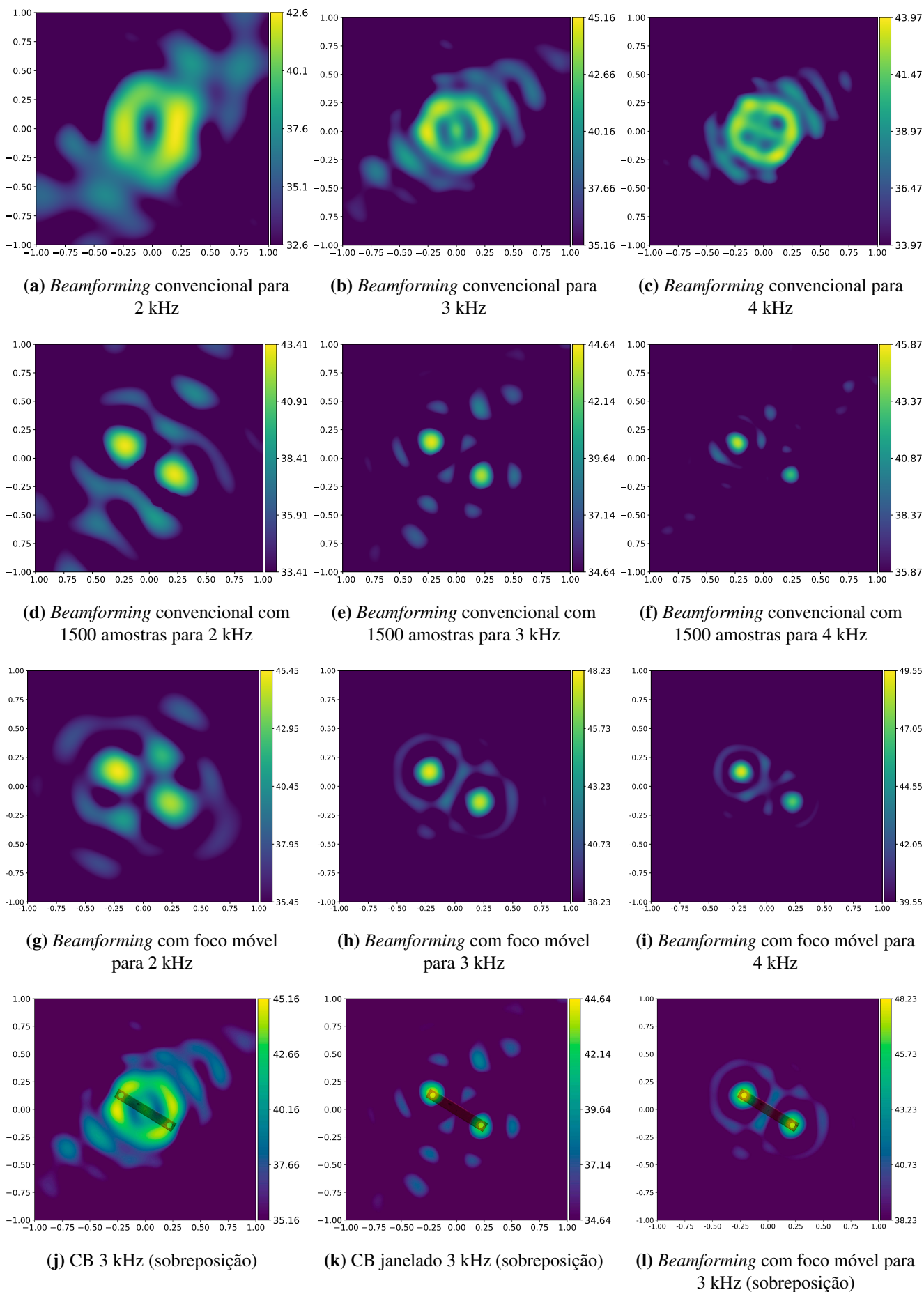


Figura 13: Mapas gerados para três diferentes análises para arranjo de raio 0,50 m a dois metros do protótipo.



fontes estão em movimento, um *borrão* circular foi obtido [18]. Note que o raio do borrão circular é de 25 cm, de acordo com a posição das fontes do protótipo.

Posteriormente, ainda no domínio da frequência (foco fixo), foram processados frações dos sinais de meia volta (*janelamento temporal*), objetivando visualizar a posição do protótipo em momentos distintos. Para esta segunda análise, foram utilizadas frações de 1500 amostras do sinal medido, veja as Figuras 13 (d), 13 (e) e 13 (f). Observe que neste caso, as figuras mostram duas fontes principais, conforme esperado.

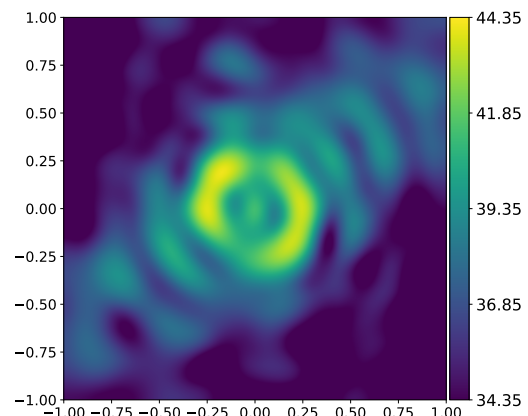
Para a terceira análise, foi utilizado o *beamforming* no domínio do tempo com foco fixo. Obteve-se também imagens com um borrão circular, vide Figuras 14 (a) e 14 (b).

Por fim, utilizou-se do *beamforming* no tempo com foco móvel. Neste caso, o pós-processamento gira virtualmente o arranjo na mesma rotação das pás. Com isso, a posição relativa entre fontes sonoras e microfones é aproximadamente constante. Logo, obteve-se imagens definidas, sem o borrão, observe as Figuras 13 (g), 13 (h) e 13 (i). Nessa última análise, há pequenas variações nas imagens, pois a velocidade de rotação não era exatamente constante, devido a simplicidade do protótipo.

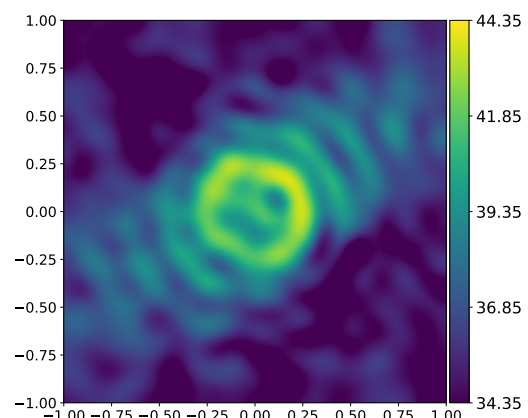
Sobre os resultados, duas considerações devem ser explicadas. Primeiro, a abertura foi mantida em ± 1 m em ambos os eixos. Em segundo lugar, os níveis absolutos em dB do Acoular devem ser desconsiderados, observando apenas as diferenças relativas entre máximos e mínimos, pois a bancada não foi calibrada. Observe ainda alguns resultados com a sobreposição (*overlay*) das pás do protótipo, veja as Figuras 13 (j), 13 (k) e 13 (l).

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo apresentou a construção de um modelo rotativo simplificado para simular um aerogerador em escala. Os objetivos de tal construção foram o estudo de aspectos experimentais da norma IEC 61400-11:2002 (que versa sobre a medição de ruído de aerogeradores), bem como o teste de *imageamento acústico* via *beamforming* — este, com abordagens no tempo e frequência, e para focos fixo e móvel.



(a) 3 kHz



(b) 4 kHz

Figura 14: *Beamforming* no tempo, foco fixo, para 3 kHz e 4 kHz, com arranjo de raio 0,50 m a dois metros do protótipo.

O controle do sistema se deu com a integração entre Arduino e Matlab, de modo que as aquisições foram feitas com microfones capacitivos de eletreto de custo reduzido. Na abordagem simplificada da norma IEC, foi possível estimar o NPS para as posições de receptores propostas pela norma. No que tange ao imageamento acústico, observou-se os efeitos do movimento rotativo nas imagens, bem como utilizou-se da rotação virtual do arranjo para suprimir o borrão gerado pelo movimento. Ainda, o janelamento temporal também rendeu resultados sem o borrão, porém, ele está sujeito à relação de *revoluções por minuto* para uma determinada taxa de amostragem temporal.

Embora com um sistema relativamente simplificado, foi possível aplicar técnicas avançadas de pós-processamento, bem como obteve-se um avanço em técnicas de imageamento acústico desenvolvidas na Engenharia Acústica da UFSM. Ademais, relacionado ao ensino, proporcionou-se uma experiência *hands-on*, testando na prática

princípios de acústica e processamento de sinais previamente estudados. As atividades também promoveram o desenvolvimento de novos códigos computacionais em Matlab e Python — que integraram as soluções executadas.

Este projeto básico pode ser livremente recriado como uma bancada de ensino (ou pesquisa) por outro profissionais. Materiais complementares estão disponíveis no repositório do [GitHub](#) em

- <https://github.com/eac-ufsm/fia2022-fonte-rotativa>.

8. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao curso de Engenharia Acústica (EAC), da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), pelo apoio e infraestrutura. Agradecemos também aos seus programas FIPE-CT e FIEEX-CT, por financiarem e apoiarem este projeto. Ademais, agradecemos à empresa Max Solar Instrumentação pelo apoio para com os instrumentos utilizados no *beamforming*.

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] Global Wind Energy Council. Global Wind Report 2022, Acesso em junho de 2022 . Disponível em: <https://gwec.net/global-wind-report-2022/>.
- [2] epbr. Eólica chega a 21 GW de capacidade instalada no Brasil, Acesso em junho de 2022 . Disponível em: <https://bit.ly/eolica-21gw-brasil>.
- [3] Sanchez, Thiago Medeiros. *Construção de um protótipo simplificado de fonte sonora rotativa e medição utilizando princípios da norma IEC 61400-11 e imageamento sonoro via beamforming*. Trabalho de conclusão de curso, Engenharia Acústica, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, RS, Brasil, 2021.
- [4] International Electrotechnical Commission (IEC). IEC 61400-11: Wind Turbine Generator Systems – Part 11: Acoustic noise measurement techniques, págs. 1–123, 2002. Disponível em: <https://webstore.iec.ch/publication/19736>. International Standard.
- [5] Van Veen, Barry D. e Buckley, Kevin M. Beamforming: A versatile approach to spatial filtering. *IEEE ASSP Magazine*, 5(2):4–24, 1988. doi: 10.1109/53.665.
- [6] Fonseca, William D’Andrea. *Desenvolvimento e aplicação de sistema para obtenção de imagens acústicas pelo método do beamforming para fontes em movimento*. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2009. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/92534>.
- [7] Johnson, D. H. e Dudgeon, D. E. *Array Signal Processing: Concepts and Techniques*. Prentice Hall PTR, Feb. 1993. ISBN 978-0130485137.
- [8] 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. ISBN 978-8591677405. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/107608>.
- [9] 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).
- [10] 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>.
- [11] Lehmann, Marius; Spehr, Carsten; Schneider, Marc e Ernst, Daniel. Investigations on limitations of the virtual rotating array method. Em *8th Berlin Beamforming Conference (BeBeC)*, págs. 1–13, Berlim, Alemanha, março 2020. GfAI Gesellschaft zur Förderung angewandter Informatik e.V. Disponível em: <https://www.bebec.eu/fileadmin/bebec/downloads/bebec-2020/papers/BeBeC-2020-D11.pdf>.
- [12] Herold, Gert e Sarradj, Ennes. Microphone array method for the characterization of rotating sound sources in axial fans. *Noise Control Engineering Journal*, 63(6):546–551, 2015. doi: 10.3397/1/376348.
- [13] Christensen, J. J. e Hald, Jørgen. Technical Review: Beamforming. Technical Report 1, Brüel & Kjær Sound & Vibration Measurement A/S, Nærum, Dinamarca, 2004. Disponível em: <https://www.bksv.com/media/doc/bv0056.pdf>.
- [14] Oerlemans, Stefan. *Detection of aeroacoustic sound sources on aircraft and wind turbines*. Tese de doutorado, Universidade de Twente, Enschede, Países Baixos, 2009. ISBN 978-9080634398. Disponível em: https://research.utwente.nl/files/6119338/thesis_S_Oerlemans.pdf.
- [15] Ocker, Christof; Herold, Gert; Krömer, Florian; Pantert, Wolfram; Sarradj, Ennes e Becker, Stefan. A comparison of frequency-domain microphone array



- methods for the characterization of rotating broadband noise sources. *Acta Acustica united with Acustica*, 105(1):66–74, 2019. doi: [10.3813/AAA.919288](https://doi.org/10.3813/AAA.919288).
- [16] Sijtsma, Pieter. Beamforming on moving sources. *Netherlands Aerospace Centre (NLR)*, págs. 1–29, maio 2006. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/53034218.pdf>. Technical Report (NLR-TP-2006-733).
- [17] Ma, Ping; Lien, Fue-Sang e Yee, Eugene. Computational acoustic beamforming for noise source identification for small wind turbines. *International Scholarly Research Notices*, 2017:1–27, 2017. doi: [10.1155/2017/7061391](https://doi.org/10.1155/2017/7061391). Article ID 7061391.
- [18] Fischer, Jeoffrey; Doolan, Con e Zajamsek, Branko. Aeroacoustic beamforming of a model wind-turbine in anechoic and reverberant environments. *Proceedings of ACOUSTICS 2016*, págs. 1–10, nov. 2016. Disponível em: https://www.acoustics.asn.au/conference_proceedings/AASNZ2016/papers/p16.pdf.
- [19] Jekosch, Simon e Sarradj, Ennes. An Extension of the Virtual Rotating Array Method Using Arbitrary Microphone Configurations for the Localization of Rotating Sound Sources. *Acoustics*, 2(2):330–342, maio 2020. ISSN 2624-599X. doi: [10.3390/acoustics2020019](https://doi.org/10.3390/acoustics2020019).
- [20] Jekosch, Simon; Herold, Gert e Sarradj, Ennes. Virtual rotating array methods for arbitrary microphone configurations. Em *8th Berlin Beamforming Conference (BeBeC)*, págs. 1–14, Berlim, Alemanha, março 2020. GfAI Gesellschaft zur Förderung angewandter Informatik e.V. Disponível em: <https://www.bebec.eu/fileadmin/bebec/downloads/bebec-2020/papers/BeBeC-2020-D10.pdf>.
- [21] Jekosch, Simon e Sarradj, Ennes. An Inverse Microphone Array Method for the Estimation of a Rotating Source Directivity. *Acoustics*, 3(3):462–472, junho 2021. ISSN 2624-599X. doi: [10.3390/acoustics3030030](https://doi.org/10.3390/acoustics3030030).
- [22] Zhang, Ce; Ma, Wei; Sarradj, Ennes; Jekosch, Simon e Herold, Gert. Modified Fast Fourier Transformation computation of steering vectors in virtual rotating array beamforming. Em *9th Berlin Beamforming Conference (BeBeC)*, págs. 1–11, Berlim, Alemanha, junho 2022. GfAI Gesellschaft zur Förderung angewandter Informatik e.V. Disponível em: <https://www.bebec.eu/fileadmin/bebec/downloads/bebec-2022/papers/BeBeC-2022-D08.pdf>.
- [23] 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>.
- [24] 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>.
- [25] Herold, Gert. *One Ring to Find Them All: Detection and Separation of Rotating Acoustic Features with Circular Microphone Arrays*. Tese de doutorado, Technical University of Berlin, Berlim, Alemanha, 2021. doi: [10.14279/depositon-12591](https://doi.org/10.14279/depositon-12591).

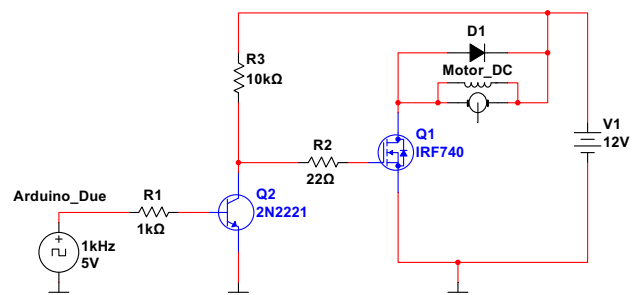
A. MATERIAL SUPLEMENTAR

Esta seção apresenta de forma breve o esquemático e um exemplo de montagem do controle para o motor DC utilizado no projeto (discutido na Seção 3), veja a Figura 15.

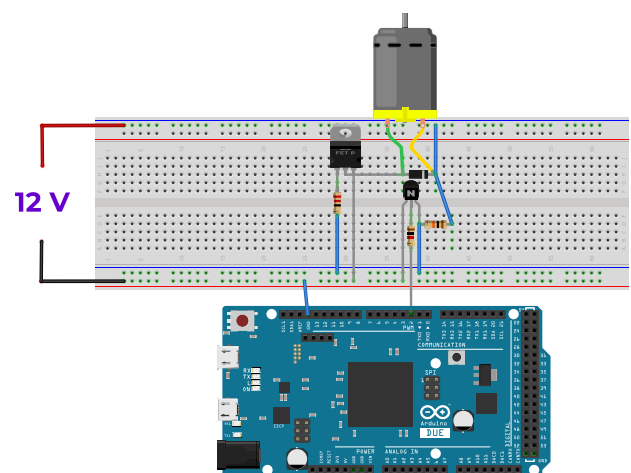
No repositório do [GitHub](https://github.com/eac-ufsm/fia2022-fonte-rotativa)

- <https://github.com/eac-ufsm/fia2022-fonte-rotativa>

é possível encontrar o circuito SPICE para simulação, bem como o modelo da Figura 15 (b) (este, para edição no [Fritzing](https://www.fritzing.com/)). É possível obter também o *software* de controle desenvolvido em Matlab — que possui um interface gráfica (GUI).



(a) Esquemático



(b) Montagem com Arduino Due

Figura 15: Circuito de controle do motor DC.