

CLASSIFICAÇÃO DE FONTES DE RUÍDO INDUSTRIAL COM TÉCNICAS DE MAPAS DE RUÍDO E BEAMFORMING

Luís Conde Santos, Jorge Preto ^{1*}

¹ dBwave.i - Acoustic Engineering, SA, Oeiras, Portugal (www.dbwave.pt)

RESUMO

O ruído é um dos aspetos ambientais em que parece mais difícil garantir o pleno cumprimento dos limites legais, especialmente em instalações industriais complexas com uma multiplicidade de fontes de ruído. Muitas vezes estão presentes características tonais, o que pode levar a uma penalização tonal de acordo com as normas de ruído. Este artigo descreve a aplicação conjunta de técnicas de modelação acústica de mapas de ruído e de técnicas de *beamforming* de câmaras acústicas, para identificar, localizar e classificar fontes de ruído industrial, incluindo aquelas com forte conteúdo tonal, mostrando como esse uso combinado pode ajudar no desenvolvimento de planos eficazes de redução de ruído para plantas industriais. O processo pode partir do desenvolvimento de um modelo acústico ao qual é aplicado um processo de validação baseado em ensaios com *beamforming* ou, ao revés, começar nas medições com *beamforming* e desenvolver o modelo acústico com base nessas medições. São apresentados e discutidos exemplos práticos.

ABSTRACT

Noise is one of the environmental aspects where it seems more difficult to guarantee full compliance with legal limits, especially in complex industrial plants with a multitude of noise sources. Very often tonal characteristics are present, which may lead to tonal penalty according to noise regulations. This paper describes the application of noise mapping combined with acoustic camera beamforming techniques, to identify, localize and rank industrial noise sources, including those with strong tonal content, showing how this combined use can help in the development of effective noise reduction plans for industrial plants. The process can start from the development of an acoustic model to which a validation process based on beamforming tests is applied or, on the contrary, start on beamforming measurements and develop the acoustic model based on these measurements. Practical examples are presented and discussed.

Palabras Clave - *beamforming*, mapas de ruído, localização de fontes de ruído, plano de ação de ruído, controlo de ruído industrial.

1. INTRODUÇÃO

As avaliações de ruído ambiental em torno de instalações industriais são geralmente realizadas através de medições de curto ou longo prazo na envolvente do local e perto de recetores sensíveis, como habitações, onde o cumprimento dos limites legais deve ser verificado. Normalmente, os limites legais relacionados com o incómodo causado pelo ruído nas imediações de uma fábrica (ou outra atividade ruidosa) podem ser estabelecidos em termos da diferença entre o ruído residual (fábrica off) e o ruído ambiente (fábrica on), tendo também em conta características específicas do ruído, como a tonalidade e impulsividade e, em alguns casos, o conteúdo de baixa frequência. Quando os limites legais são excedidos, a fábrica é obrigada a tomar medidas para reduzir as suas emissões sonoras.

As medidas de redução do ruído podem ser muito dispendiosas e, por conseguinte, devem ser cuidadosamente estudadas, para que sejam selecionadas as fontes de ruído certas e tomadas as medidas adequadas de controlo do ruído. Não o fazer leva normalmente a que uma empresa gaste muito dinheiro, que pode facilmente ascender a várias dezenas ou centenas de milhares de euros e acabar por não cumprir os critérios legais. Isto é particularmente verdadeiro em instalações industriais complexas, com um grande número de fontes de ruído, onde não é de todo possível descobrir quais são as fontes mais importantes apenas "por feeling", e, também, não se pode ligar e desligar cada fonte individualmente para medir suas contribuições separadas para o ruído ambiente observado próximo de habitações. Assim, para identificar e classificar corretamente as fontes de ruído e estabelecer um plano de ação realista de controlo do ruído, é necessário recorrer a técnicas avançadas de modelação e/ou medição.

* **Autor de contacto:** luis.conde@dbwave.pt

Copyright: ©2023 Luís Conde Santos et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 Unported License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

O desenvolvimento de técnicas de modelação computacional que simulam a emissão e propagação acústicas, permite modelar, atualmente, com bastante precisão e rapidez, os cenários mais complexos de geração e propagação de ruído [1]. Os resultados são normalmente apresentados sob a forma de mapas de ruído coloridos, correspondendo cada cor a um determinado intervalo de níveis de ruído, normalmente em classes de 5 dB. Acima de tudo, um modelo acústico, se corretamente desenvolvido, permite classificar as fontes de ruído, extrair as contribuições individuais de cada fonte de ruído para um determinado recetor, atualizar as informações sempre que mudanças são introduzidas na fábrica e estabelecer planos de ação detalhados de controle de ruído com resultados previsíveis. Também podem ser obtidos mapas de diferenças a partir do mesmo modelo, a fim de apresentar mapas de antes vs. depois, mapas de ruído ambiente vs. ruído residual, ou mapas de cenário 1 – cenário 2, etc. Ao classificar as fontes e prever o resultado prático de qualquer cenário, pode-se efetivamente otimizar o investimento em ações de controle de ruído.

Dito isto, o desenvolvimento de um modelo acústico fiável de uma fábrica, que possa ser efetivamente utilizado para estabelecer um plano de ação de ruído ambiental bem-sucedido, não é assim tão fácil. Obter os dados de entrada adequados é, como em qualquer modelo, a parte mais crítica do trabalho: a expressão "garbage in, garbage out" faz todo o sentido neste contexto [2]. Na prática, a potência sonora de cada fonte é estimada, a partir de medições de pressão sonora próximas da fonte, e eventualmente ajustada, após um processo de validação, para ajustar o modelo e torná-lo o mais próximo possível da realidade. Vale a pena dizer que o principal interesse em obter um modelo fiável e preciso reside em poder calcular corretamente as contribuições da fonte nos recetores relevantes, tal como habitações na envolvente próxima da fábrica. Neste caso, o processo de validação deve ter isso em conta.

Há situações, no entanto, em que um processo de validação do modelo por medições do nível de pressão sonora não é suficiente para ter certeza sobre os resultados ou, em outros casos, em que queremos realizar uma primeira verificação para confirmar quais são as áreas mais relevantes da fábrica para incluir no modelo. Noutras situações, pode-se ter dificuldades em identificar a origem de um tom de frequência específico que pode levar a uma penalização regulamentar ou, eventualmente, ter dúvidas sobre a influência da diretividade de alguma fonte sobre sua contribuição num determinado recetor, ou simplesmente não conseguir chegar a uma fonte para medi-la (por exemplo, chaminé de uma fábrica). Todas estas situações são casos em que pode ser muito útil fazer uso de técnicas adequadas de *beamforming* recorrendo a câmaras acústicas.

Este artigo resume as metodologias envolvidas, que têm vindo a ser aplicadas em vários tipos de indústrias, onde a aplicação de mapeamento de ruído, combinado com técnicas de *beamforming* de câmaras acústicas, tem sido utilizada para

identificar, localizar e classificar fontes de ruído industrial, mostrando como este uso combinado pode ajudar no desenvolvimento de planos eficazes de redução de ruído para instalações industriais. Tal é ilustrado com um caso prático.

2. APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE MAPAS DE RUÍDO

Para o desenvolvimento de um mapa de ruído industrial é necessário modelar todas as variáveis envolvidas no complexo problema ambiental que é o ruído, para que a previsão computacional obtida a partir do modelo físico de propagação sonora possa ser o mais precisa possível.

Os próximos parágrafos descrevem com mais detalhe as informações necessárias para a produção de um modelo acústico preciso e fiável.

Software: O software utilizado para a elaboração de mapas de ruído industriais, como por exemplo o CadnaA, é geralmente configurado definido para seguir a norma internacional recomendada para ruído industrial, ou seja, ISO 9613-2.

Topografia: Na elaboração de um mapa de ruído, são necessárias informações sobre a altimetria do terreno, incluindo curvas de nível e pontos cotados. A partir dessas informações, o modelo digital do terreno é construído e usado como base para a simulação.

Área do mapa: A área do mapa é a área definida como a área circundante na envolvente da unidade industrial. É escolhida de modo a poder considerar a influência sonora da fábrica nas áreas residenciais circundantes.

Dados sobre edifícios e outros elementos construtivos: Os edifícios pertencentes à fábrica, todos os edifícios residenciais e industriais circundantes, bem como alguns objetos de interesse como muros e taludes, que funcionam como "barreiras acústicas" na propagação do som ao ar livre, devem ser identificados e introduzidos no modelo.

Caracterização das fontes de ruído: O trabalho de campo é realizado para identificar todas as principais fontes de ruído da fábrica e avaliar a potência sonora emitida por cada fonte identificada. É criada uma base de dados de fontes de ruído com a informação técnica necessária para a modelação de cada fonte. Os níveis de pressão sonora, L_p , medidos perto de cada fonte, geralmente em bandas de terço de oitava, são posteriormente convertidos em níveis de potência sonora, L_w , tendo em conta as correções aplicadas ao tipo de fonte e tipo de propagação sonora.

Validação/calibração do modelo: um modelo acústico preciso depende fortemente da qualidade dos dados de entrada. Para reduzir as incertezas associadas à estimativa dos níveis de potência sonora das fontes, obtidos a partir de medições de nível sonoro em campo próximo, um extenso processo de validação/calibração é implementado depois que todos os dados de entrada são introduzidos no modelo e um primeiro cálculo de mapa é feito. A validação do modelo acústico é feita comparando os níveis de pressão sonora

medidos no campo com os valores calculados nos mesmos pontos, tendo em conta as condições reais de funcionamento da instalação durante essas medições de campo.

A partir do modelo, é então possível identificar, caracterizar e classificar todas as fontes de ruído relevantes com base na sua influência acústica em pontos recetores relevantes em torno da fábrica. Normalmente, estes estão localizados nos limites de propriedade da instalação e/ou em recetores sensíveis (como casas), em determinados locais.

Depois de comparar os níveis de ruído previstos em recetores relevantes com critérios estabelecidos e ter identificado e classificado as fontes de acordo com as suas contribuições individuais para os níveis de ruído globais nesses recetores, é então possível propor as reduções de ruído necessárias para cada fonte, conforme necessário para cumprir os limites de ruído, de preferência com uma margem de segurança razoável, a fim de ter em conta as incertezas tanto das medições como dos cálculos.

Desta forma, o risco de futuras queixas / reclamações por parte dos vizinhos, ou de incumprimento dos limites legais, pode ser altamente reduzido. Além disso, o mapa de ruído e as informações associadas fornecidas com ele, podem tornar-se uma importante ferramenta de gestão de ruído para a equipa de Qualidade, Ambiente e Segurança da fábrica.

3. APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE BEAMFORMING

A Câmara Acústica é uma ferramenta de medição que, de um modo geral, utiliza técnicas de *beamforming* de atraso-e-soma. Esta tecnologia calcula o cenário sonoro real num mapa sonoro visual, que consiste numa sobreposição de diferentes fontes sonoras. O princípio básico baseia-se no cálculo preciso dos atrasos temporais específicos das emissões sonoras que radiam de várias fontes para os microfones individuais de uma matriz [3]. A abordagem mais simples é o cálculo direto de uma função de atraso-e-soma no domínio do tempo, em que a função de tempo reconstruída em cada local x é calculada de acordo com [4]:

$$\hat{f}(\mathbf{x}, t) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M w_i f_i(t - \Delta_i). \quad (1)$$

Onde t é o tempo, M é o número de microfones na matriz de sensores, e w_i são ponderações de sombreamento espacial. A Figura 1 ilustra este princípio com um exemplo simples usando duas fontes pontuais situadas em frente a um conjunto de microfones com 4 canais.

A função de *beamforming* de atraso-e-soma no domínio da frequência baseia-se num princípio semelhante ao da função no domínio do tempo. O diagrama de blocos na Figura 2 ilustra o mesmo exemplo simples, usando duas fontes pontuais.

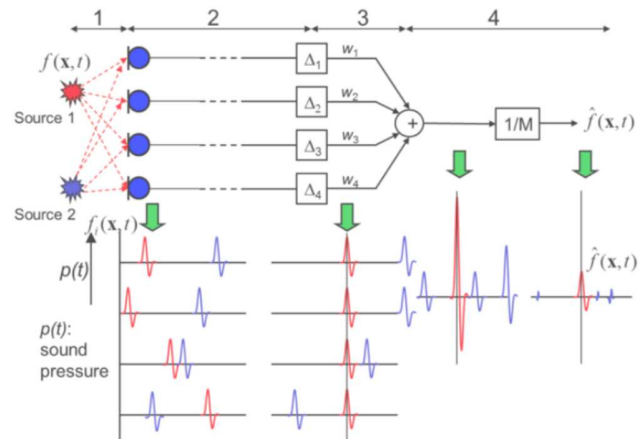


Figura 1. Princípio de *beamforming* no domínio do tempo [5].

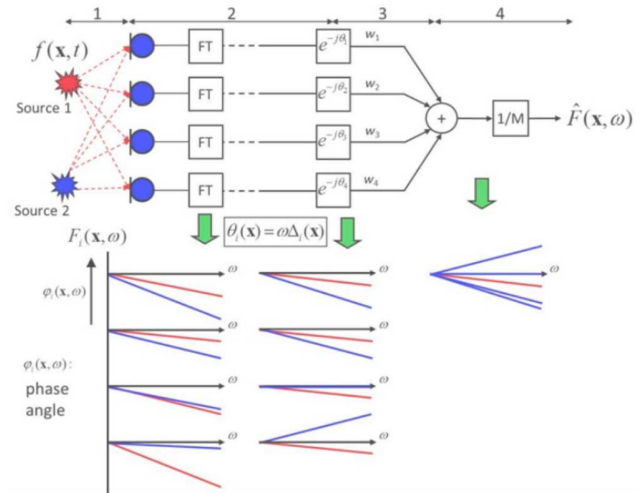


Figura 2. Princípio de *beamforming* no domínio da frequência [5].

4. CASO PRÁTICO DE ESTUDO

Trata-se de uma fábrica existente desde meados da década de 1950, abrangida pelo procedimento de licenciamento ambiental no âmbito do PCIP (Prevenção e Controlo Integrados da Poluição). A monitorização de ruído realizada regularmente para a renovação da licença ambiental, mostrou a existência de níveis sonoros significativos numa área residencial a oeste da fábrica, sendo as duas principais fontes de ruído: a própria fábrica e uma estrada nacional, situada entre a fábrica e a referida área residencial. Perante esta situação e considerando o conceito de corresponsabilidade definido pela Agência Portuguesa do Ambiente (APA), verificou-se que a contribuição em termos de ruído proveniente de cada uma destas fontes era de cerca de 50%.

Para reduzir a corresponsabilidade da fábrica, a empresa decidiu desenvolver um mapa de ruído e um plano de ação. Para isso, foi criado um modelo acústico, que incluiu cerca de 200 fontes de ruído, cada uma das quais medida em campo

próximo, e o modelo foi validado por medições em 52 pontos de validação, dentro dos limites do perímetro industrial, e 5 pontos de validação perto de recetores sensíveis. A figura seguinte mostra um exemplo do trabalho de campo.

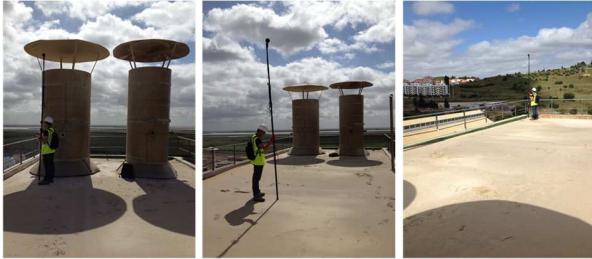


Figura 3. Exemplo de medição de campo próximo de duas chaminés ruidosas (esquerda) e pontos de validação próximos, na direção da área residencial.

A estrada nacional também foi incluída no modelo, como a principal fonte de ruído de fundo, para que a corresponsabilidade de ambas as fontes de ruído pudesse ser calculada. Uma vista 3D do mapa de ruído total (fábrica + estrada) para o indicador noturno L_n é mostrada na figura abaixo.

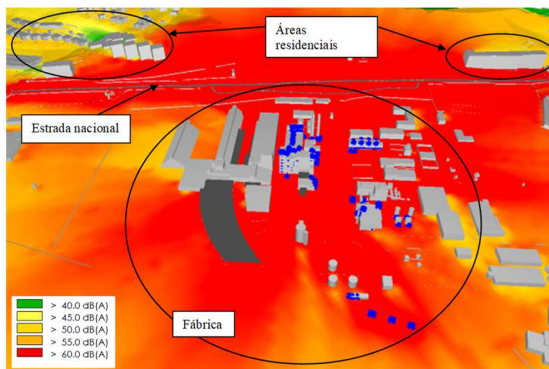


Figura 4. Vista 3D do mapa de ruído L_n , incluindo a fábrica e a estrada nacional.

O objetivo do plano de ação foi fixado em termos de L_{den} e L_n do ruído particular (RP) perto das zonas residenciais tal que: $L_{den}(RP) < 62$ dB(A); $L_n(RP) < 52$ dB(A). Note-se que os limites legais aplicáveis à área residencial, de acordo com o plano diretor municipal, são de 65/55 dB(A) respetivamente para L_{den}/L_n , o que significa que o objetivo definido corresponde ao ruído particular estar pelo menos 3 dB(A) abaixo dos limites regulamentares. Isto permite alguma margem para acomodar a contribuição do ruído residual, nomeadamente da estrada nacional, ou seja: uma quota de ruído de 50% para cada um (ruídos particular e residual).

O plano de ação foi dividido nas seguintes 3 fases:

1. Intervenção num grande condensador arrefecido a ar, a fonte de ruído com maior contribuição, consistindo na

substituição de ventiladores, redutores, motores e variadores de frequência.

2. Introdução de silenciadores em 5 chaminés no terraço de um dos edifícios de produção.
3. Intervenção ao nível de janelas e aberturas, nomeadamente nas fachadas de um edifício de Moagem.

Após a conclusão da fase 1, foram realizadas novas medições de ruído, quer na proximidade do condensador quer nos pontos de validação, para verificar os resultados obtidos, concluindo-se que estavam de acordo com o previsto pelo modelo: entre 10 e 12 dB(A) de redução de ruído na emissão do condensador refrigerado a ar e de 4 a 5 dB(A) de redução do ruído particular nas zonas residenciais, até 54 dB(A) para o L_n . No entanto, antes de passar para a fase 2, foi necessário realizar estudos de engenharia adicionais, incluindo cálculos de CFD (Computer Fluid Dynamics), para a otimização dos silenciadores – tal foi necessário porque havia limites para a altura máxima das chaminés, devido a um aeródromo próximo, e limites devido às entradas de ar das chaminés para monitorizar as emissões de gases.

Neste ponto, também foi decidido cruzar os resultados do modelo, recorrendo a testes de *beamforming* no caminho de propagação entre as chaminés e a área residencial mais exposta. Um primeiro teste foi realizado perto da área residencial, a cerca de 400 m de distância do edifício de produção com as chaminés ruidosas, a fim de confirmar que o condensador arrefecido a ar deixou de ser um problema e que a segunda fonte mais importante eram as chaminés, conforme previsto no modelo. A figura seguinte mostra a posição da câmara acústica e os principais resultados obtidos, para o ruído global em dB(A).

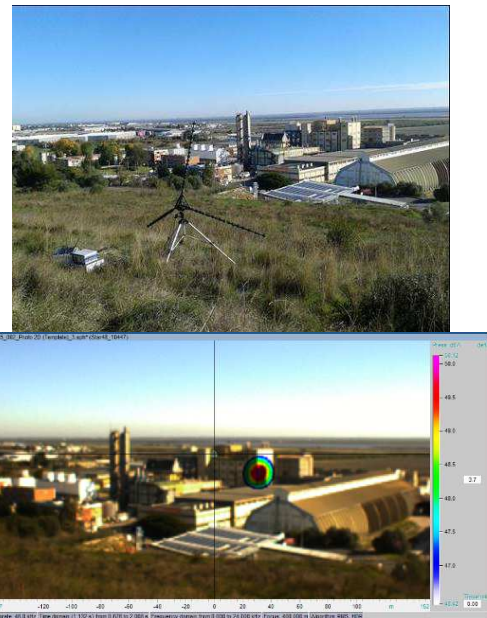


Figura 5. Testes de *beamforming*, a 400 m das fontes.

Note-se que para uma distância tão grande, a menos que não haja vento, é muito possível que ocorra alguma refração ao longo do caminho de propagação e que, portanto, o ângulo de chegada se desvie ligeiramente da direção da fonte. Embora isto seja geralmente desprezável para a direção horizontal, não é o caso para a direção vertical: a fonte aparente aparecerá mais alta do que a fonte real, caso haja propagação do vento descendente, e mais baixa, no caso da propagação do vento ascendente [6]. Como mostra a figura acima, foi encontrado um desvio vertical para baixo de cerca de 10 m entre o foco de ruído que aparece na imagem da câmara acústica e a posição das chaminés mais ruidosas. A análise dos dados de vento para o intervalo da medição mostrou que ocorreu uma ligeira condição de vento ascendente, de modo que um desvio de cerca de 1,4 graus na direção vertical de propagação do som, ao longo da trajetória de propagação de 400 m, é plausível, o que corresponde ao erro vertical de 10 m: $\arcsen(10/400) = 1,4^\circ$.

Uma pesquisa no espectro do sinal gravado revelou a origem de uma tonal na banda de 1/3 de oitava de 315 Hz: uma das 5 chaminés, instalada à esquerda e a uma altura inferior às duas mais barulhentas, como pode ser visto na figura abaixo, contabilizando o deslocamento vertical para baixo de cerca de 10 m. Note-se que esta chaminé era, de facto, a única fonte de ruído no edifício com uma tonal nesta banda de frequência, nas medições de campo próximo. O facto de ser detetado na câmara acústica a 400 m de distância é muito relevante, pois pode gerar uma penalização tonal de acordo com a regulamentação em vigor.

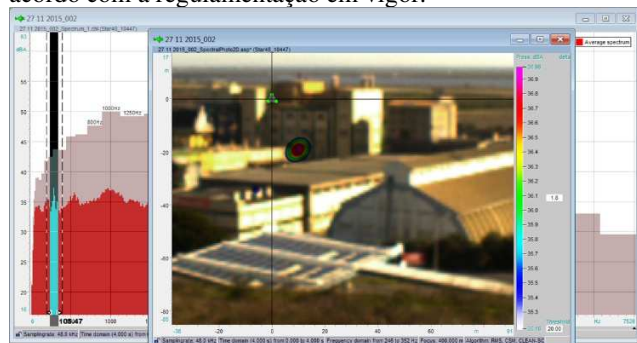


Figura 6. Identificação da origem de uma tonal aos 315 Hz.

Para confirmar os resultados, foi realizado um segundo teste de *beamforming*, onde a câmara acústica foi instalada mais perto das fontes, no telhado de um armazém próximo dentro da fábrica, a uma distância aproximada de 100 m das fontes, como mostra a figura 7.

Este segundo teste foi realizado num dia diferente, quase sem vento, e os resultados foram bastante claros, mostrando definitivamente a prevalência das chaminés ruidosas como as fontes de ruído com maior contribuição na direção dos recetores sensíveis, como exemplificado na figura 8.

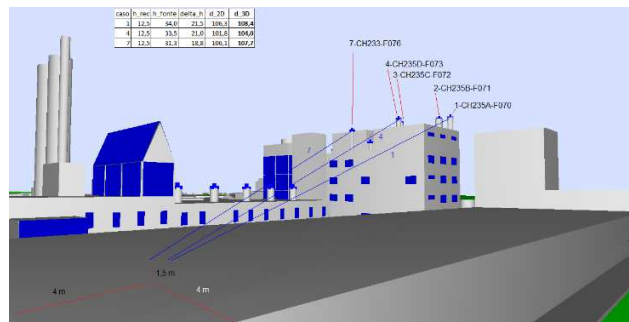


Figura 7. Geometria do segundo teste de *beamforming*.



Figura 8. Ilustração dos testes realizados a 100 m das fontes de ruído em estudo.

Os resultados dos testes de *beamforming* foram cruciais neste projeto, para confirmar a necessidade de medidas de redução de ruído nas chaminés e para que a empresa decidisse avançar para a segunda fase do plano de ação de investimento. No final, a empresa decidiu alterar o processo de produção, desativando os sistemas de ventilação que incluíam as chaminés ruidosas – uma ação alternativa e ainda mais eficaz de controlo de ruído (eliminar as fontes de ruído!).

5. CONCLUSÕES

A aplicação de mapeamento de ruído combinado com técnicas de *beamforming* de câmaras acústicas, é uma

ferramenta muito poderosa para identificar, localizar e classificar fontes de ruído industrial. A sinergia e complementaridade entre as duas técnicas certamente contribuem para melhorar a precisão dos dados de ruído obtidos, que é a base para planos eficazes de redução de ruído para instalações industriais. A experiência dos autores e a de outros [7] mostra que, embora seja necessária uma grande quantidade de trabalho e tecnologia de ponta para produzir modelos acústicos industriais fiáveis, vale a pena o esforço, uma vez que ajuda definitivamente a alcançar os melhores resultados possíveis em programas de redução de ruído para um determinado investimento. O cruzamento dos resultados dos modelos de mapeamento de ruído com os obtidos a partir de ensaios de *beamforming*, representam uma importante mais-valia para a previsibilidade do resultado dos projetos de redução de ruído, reduzindo os riscos inerentes ao mesmo e associados à empresa.

6. REFERENCIAS

- [1] Probst, W. Modelling of Industrial Plants in the Framework of Sound Immission Plans. Proceedings of InterNoise 2000, Nice, France, 2000.
- [2] Santos, L.C.; Matias C.; Vieira, F.; Valado, F. Noise Mapping of Industrial Sources. Acústica 2008, October 20–22, 2008, Coimbra, Portugal, art. ID. 249.
- [3] Heilmann, G. Sound Source localization in 2D and 3D using Delay and Sum Beamforming. 1st International Congress on Acoustics, Buenos Aires, June 2008.
- [4] Heilmann, G.; Böck, M. Exploring the limitations and expectations of sound source localization and visualization techniques. InterNoise 2014. Melbourne, Australia, 2014.
- [5] Alloza, P.; Vonnheim, B. Noise source localization in industrial facilities. InterNoise 2019. Madrid, Spain, 2019.
- [6] Wilson, K.; Ostachev, V.; Voronovich, A.; Collier, S. Source Localization in the Atmosphere by Means of Beamforming and Tomography. InterNoise 2000. Nice, France, 2000.
- [7] Fiebig, W.; Dabrowski, D. Use of Acoustic Camera for Noise Sources Localization and Noise Reduction in the Industrial Plant. Archives of Acoustics. Vol. 45, No. 1, pp. 111–117 (2020).