

# Caracterização da Direcionalidade do Ruído Veicular utilizando Técnicas de Beamforming

Felipe R. Petraglia, Julio Cesar B. Torres, Michael Vorländer, Mariane R. Petraglia

**Resumo**—O ruído do tráfego nas áreas urbanas aumentou significativamente nos últimos anos, o que pode afetar a qualidade de vida humana e levar a problemas de saúde significativos, como doenças cardiovasculares e distúrbios do sono. Uma técnica de auralização realista para cenários de ruído de tráfego seria uma ferramenta valiosa para gestores de cidade, pois permitiria a avaliação prévia dos efeitos de mudanças nas vias públicas e a procura de soluções de redução de ruído. Neste contexto, é desejável incorporar características precisas dos sinais sonoros emitidos por veículos, a fim de fornecer uma experiência auditiva precisa. Neste trabalho, a partir de um banco de dados contendo sons de veículos gravados por um conjunto de microfones, as principais fontes de origem de ruído são localizadas e seus sinais sonoros são isolados usando algoritmos de estimativa de direção de chegada (DoA) e formadores de feixe. Após a filtragem espacial das fontes principais, é realizada a caracterização da diretividade-frequência de diversas fontes acústicas veiculares, considerando diferentes velocidades e modelos de veículos. Uma avaliação comparativa de algoritmos de estimativa da DoA e padrões de diretividade obtidos com duas abordagens de filtragem espacial (beamforming) é apresentada. As duas técnicas de filtragem espacial abordadas são Atraso e Soma (DAS) e Resposta sem Distorção de Variância Mínima (MVDR).

**Palavras-Chave**—Beamforming, Ruído veicular, Direcionalidade de sons.

**Abstract**—Traffic noise in urban areas has increased significantly in recent years, which can affect quality of life and lead to serious health problems such as cardiovascular diseases and sleep disorders. A realistic auralization technique for traffic noise scenarios would be a valuable tool for city managers, as it would allow prior assessment of the effects of changes to road infrastructure and the search for noise reduction solutions. In this context, it is desirable to incorporate accurate characteristics of the sound signals emitted by vehicles in order to provide a precise auditory experience. In this work, based on a database containing vehicle sounds recorded by a microphone array, the main noise sources are localized and their sound signals are isolated using direction-of-arrival (DoA) estimation algorithms and beamformers. After spatial filtering of the main sources, a directivity-frequency characterization of various vehicular acoustic sources is performed, considering different vehicle speeds and models. A comparative evaluation of DoA estimation algorithms and directivity patterns obtained with two spatial filtering (beamforming) approaches is presented. The two beamforming techniques utilized in this work were Delay-and-Sum (DAS) and Minimum Variance Distortionless Response (MVDR).

**Keywords**—Beamforming, Vehicular noise, Sound directivity.

Felipe R. Petraglia, PEE/COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro-RJ, e-mail: petraglia182@poli.ufrj.br; Julio C. B. Torres, DEG/POLI, PEE/COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro-RJ, e-mail: julio@poli.ufrj.br; Michael Vorländer, ITA, RWTH Aachen University, Alemanha, e-mail: mvo@akustik.rwth-aachen.de; Mariane R. Petraglia, DEL/POLI, PEE/COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro-RJ, e-mail: mariane@poli.ufrj.br.

## I. INTRODUÇÃO

A poluição sonora acústica tem forte impacto no bem-estar dos moradores das grandes cidades e é apontada pela Organização Mundial da Saúde (OMS) como um problema de saúde pública [1]. Mapas de ruído e outros parâmetros são frequentemente usados para fins de avaliação, pois fornecem um indicativo da intensidade sonora no local mapeado, representando características do som em uma escala numérica simples. Esta simplificação ajuda a estabelecer uma referência para avaliação de ruído, mas não fornece uma representação de som realista e intuitiva. Esse problema é agravado quando a avaliação do ruído é realizada por não especialistas, como gestores, políticos e público em geral.

Como alternativa, as técnicas de auralização produzem sinais de áudio que representam com a maior precisão possível a experiência auditiva que uma pessoa teria em um ambiente real. Os sistemas de auralização [2] são capazes de gerar sinais de áudio próximos dos reais a partir de uma descrição numérica apropriada da cena virtual, incluindo características da fonte, propagação e reprodução do som. Um modelo de descrição adequado influencia quão próximo o som gerado estará do real. Portanto, a implementação de um sistema de auralização requer bancos de dados com variedade de modelos de cenário acústico e de sinal de excitação apropriada.

O tráfego rodoviário é uma das principais causas de reclamação em estudos de monitoramento de ruído em áreas urbanas e é gerado principalmente por componentes de veículos como motor, pneus e escapamento [3]. Cada fonte individual tem sua própria diretividade e padrões espectrais [4], os quais devem ser modelados e anexados ao sistema de auralização. Este trabalho visa recriar situações acústicas do ambiente urbano por meio de simulação computacional [5]. Para atingir o nível de realismo necessário para o som gerado, é importante desenvolver modelos para as fontes de ruído do veículo que representem e reproduzam corretamente as características de emissão sonora. Entre os principais aspectos a serem modelados estão o nível de potência sonora, as características espectrais e a distribuição da energia sonora no espaço ao redor da fonte (padrão de diretividade da fonte). A elaboração de tais modelos de simulação requer o conhecimento prévio dessas características, que devem ser obtidas por meio de medições com veículos em movimento, uma vez que o ruído produzido pelo motor ou pela banda de rodagem só pode ser determinado durante seu funcionamento e varia com a velocidade.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma. Na Seção II duas técnicas baseadas na formação de feixes [6] são apresentadas para estimar a direção de chegada da

fonte sonora principal (vinda de um único veículo) até o centro do conjunto de microfones. Na Seção III o procedimento proposto para a obtenção do padrão de diretividade do som emitido pelos veículos em diferentes velocidades e faixas de frequência é detalhado. Na Seção IV a configuração experimental é descrita, e os resultados das estimativas do DoA e dos padrões de diretividade obtidos com os formadores de feixe Atraso e Soma (DAS) e Resposta sem Distorção de Variância Mínima (MVDR) (do inglês *Delay-and-Sum* e *Minimum Variance Distortionless Response*) são mostrados. Na Seção V são apresentados os comentários finais e sugestões de trabalhos futuros.

## II. ESTIMATIVA DE DIREÇÃO DE CHEGADA

A distância de detecção da direção de emissão acústica de um veículo em movimento depende de sua velocidade e da sua distância aos microfones que capturam o som, devido às considerações da relação sinal-ruído [7]. A propriedade dos formadores de feixe de aumentar os sinais de uma determinada direção e atenuar os sinais de outras direções pode ser usada para realizar a estimativa DoA [8]. Um formador de feixe é construído para cada direção de interesse (referida como a direção de visão do formador de feixe), e a potência de seu sinal de saída é calculada [9]. Quando a potência de saída do formador de feixe é representada graficamente em função das direções de observação, exibe um pico para cada ângulo de observação correspondente a um sinal presente. Portanto, as direções de observação que fornecem grandes saídas de energia são estimativas apropriadas para os ângulos dos principais sinais sonoros que chegam à matriz (*array*) de microfones.

Os formadores de feixe de banda estreita assumem que o sinal incidente  $s(n)$  que o formador de feixe está tentando capturar ocupa uma faixa de frequências reduzida em relação ao espectro de frequência total. Nesse caso, considerando uma matriz arbitrária de microfone de elemento  $N$  na qual este sinal de origem incide de um ângulo desconhecido e tomando o microfone  $M_0$  como o microfone de referência, pode-se escrever o vetor  $\mathbf{x}(n) = [x_1(n) \ x_2(n) \ \dots \ x_M(n)]^T$  que contém as amostras de sinal dos  $M$  microfones na amostra de tempo  $n$  como

$$\mathbf{x}(n) = [a_1 s(n - \tau_1) \ a_2 s(n - \tau_2) \ \dots \ a_M s(n - \tau_M)]^T + [v_1(n) \ v_2(n) \ \dots \ v_M(n)]^T, \quad (1)$$

onde  $a_i$  e  $\tau_i$  são, respectivamente, o ganho e o atraso do sinal  $s(n)$  no microfone  $M_i$ , e  $v_i(n)$  representa o ruído aditivo presente no respectivo microfone.

Caso o sinal  $s(n)$  seja de banda larga, como neste trabalho, ele pode ser filtrado na frequência para convertê-lo em banda estreita. Assim, deve-se garantir que o mesmo filtro passa-banda seja usado em todos os sinais da matriz de microfones, de modo que a informação de fase relativa entre os canais não seja alterada. Empregando uma transformada discreta de Fourier (DFT) de  $N$  pontos como banco de filtros, o vetor de entrada de domínio de frequência correspondente é dado por

$$\mathbf{X}(\omega) = S(\omega) [a_1 e^{-j\omega\tau_1} \ a_2 e^{-j\omega\tau_2} \ \dots \ a_M e^{-j\omega\tau_M}]^T + [V_1(\omega) \ V_2(\omega) \ \dots \ V_M(\omega)]^T, \quad (2)$$

onde  $\omega = 2\pi k/N$  com  $k = 0, 1, \dots, N-1$ . As escolhas de  $N$  e  $M$  serão discutidas na Seção IV, que apresenta os resultados experimentais. Alternativamente, podemos escrever

$$\mathbf{X}(\omega) = S(\omega)\mathbf{d}(\omega) + \mathbf{V}(\omega), \quad (3)$$

onde

$$\mathbf{d}(\omega) = [a_1 e^{-j\omega\tau_1} \ a_2 e^{-j\omega\tau_2} \ \dots \ a_M e^{-j\omega\tau_M}]^T. \quad (4)$$

Se as distâncias entre a fonte e os microfones forem consideradas grandes (suposição de campo distante), então os ganhos em cada termo do vetor dos múltiplos microfones são iguais (considerados aqui unitários), resultando em

$$\mathbf{d}(\omega) = [e^{-j\omega\tau_1} \ e^{-j\omega\tau_2} \ \dots \ e^{-j\omega\tau_M}]^T, \quad (5)$$

que é conhecido como vetor de direção (*steering vector*).

A Fig. 1 mostra a estrutura de um formador de feixe no domínio da frequência [10]. A informação espectral de cada sinal de sub-banda  $x_i(n)$  é obtida quadro a quadro no domínio da transformada de Fourier de curta duração (STFT). Para cada categoria de frequência, os coeficientes STFT  $X_{i,k}$  são multiplicados por pesos complexos apropriados  $W_{i,k}^*$  e então somados a fim de obter a representação no domínio da frequência da saída do formador de feixes.

O sinal de saída no domínio do tempo  $y(n)$  é obtido aplicando a inversa da transformada rápida de Fourier (IFFT) aos sinais resultantes  $Y(k)$ .

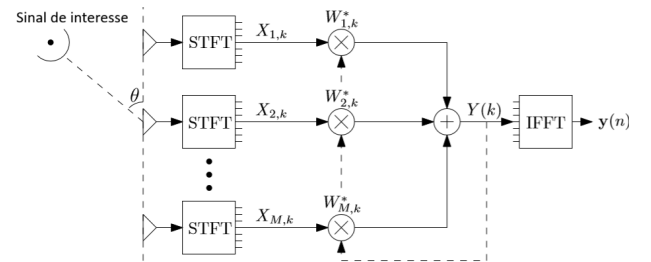


Fig. 1. Formador de feixe no domínio da frequência.

Descreveremos, a seguir, os algoritmos utilizados para determinar os coeficientes do conformador de feixes e para estimar a direção de chegada do sinal da fonte sonora principal (mais intensa sonoramente).

### A. Algoritmo DAS

Quando os pesos do formador de feixe são escolhidos de modo a introduzir mudanças de fase adequadas (atrasos) aos sinais dos diferentes canais de modo que seus componentes vindos da direção de observação se somem coerentemente, o formador de feixes permite que o sinal de interesse passe com alto ganho, enquanto os sinais de outras direções são atenuados. Este método é conhecido como formador de feixe Atraso-e-Soma [11]. Assumindo que o sinal de interesse  $s(n)$  e os sinais de ruído  $v_i(n)$  não são correlacionados, o vetor de peso DAS  $\mathbf{W}_k = [W_{1,k} \ W_{2,k} \ \dots \ W_{N,k}]^T$  para uma determinada direção, com ângulo de azimute  $\phi$  e ângulo de elevação  $\theta$ , é dado por

$$\mathbf{W}_k = \mathbf{d}(\omega), \text{ para } \omega = 2\pi k/N, \quad (6)$$

sendo  $\mathbf{d}(\omega)$  dado na Eq. (5).

Os atrasos  $\tau_i$  que determinam o vetor de direção  $\mathbf{d}(\omega)$  na Eq. (5) podem ser obtidos para cada direção de observação, conhecendo-se a geometria do conjunto de microfones.

### B. Algoritmo MVDR

O algoritmo MVDR [12] é capaz de determinar os coeficientes que minimizam a potência total de saída do formador de feixes, enquanto fixa o ganho na direção de resposta desejada como unitário. Os coeficientes MVDR são obtidos minimizando a função custo

$$J = E[|Y(k)|^2] = \mathbf{W}_k^H \mathbf{S}_{\mathbf{X}_k \mathbf{X}_k} \mathbf{W}_k \quad (7)$$

com a restrição  $\mathbf{C}_k^H \mathbf{W}_k = \mathbf{f}$ ,

onde  $\mathbf{X}_k = [X_{1,k} \ X_{2,k} \ \dots \ X_{N,k}]^T$  e  $\mathbf{S}_{\mathbf{X}_k \mathbf{X}_k} = E[\mathbf{X}_k \mathbf{X}_k^H]$  é a matriz de correlação espacial-espectral de  $\mathbf{X}_k$ . Empregamos a estimativa instantânea de  $\mathbf{S}_{\mathbf{X}_k \mathbf{X}_k}$  dada por  $\hat{\mathbf{S}}_{\mathbf{X}_k \mathbf{X}_k} = \mathbf{X}_k \mathbf{X}_k^H$ . As restrições impostas pelas matrizes  $\mathbf{C}_k$  e pelo vetor  $\mathbf{f}$  devem ser tais que o sinal desejado não seja atenuado, enquanto os sinais de outras direções são suprimidos. Ao adotar um modelo de propagação que assume as frentes de onda que excitam os sensores como planas (suposição de campo distante), as matrizes  $\mathbf{C}_k$  serão compostas pelos vetores direcionadores, ou seja,

$$\mathbf{C}_k = \mathbf{d}(\omega), \text{ para } \omega = 2\pi k/N, \quad (8)$$

e  $\mathbf{f} = 1$ . Adotando a técnica do multiplicador de Lagrange para solucionar o problema de minimização restrito acima, obtemos

$$\mathbf{W}_k = \frac{\hat{\mathbf{S}}_{\mathbf{X}_k \mathbf{X}_k}^{-1} \mathbf{C}_k}{\mathbf{C}_k^H \hat{\mathbf{S}}_{\mathbf{X}_k \mathbf{X}_k}^{-1} \mathbf{C}_k}. \quad (9)$$

A potência do sinal na direção dos formadores de feixe para a frequência de índice  $k$  é dada por

$$P_k = \mathbf{W}_k^H \hat{\mathbf{S}}_{\mathbf{X}_k \mathbf{X}_k} \mathbf{W}_k. \quad (10)$$

### C. Estimativa da DoA

Aplicamos os métodos de estimativa de DoA baseados em formador de feixe descritos acima para dados de tráfego urbano (com veículos leves) obtidos por um conjunto de microfones dispostos em uma matriz circular posicionada em um plano paralelo à trajetória do veículo. Mais detalhes da configuração experimental serão apresentados na Seção IV. Para tal configuração, os atrasos que definem o vetor  $\mathbf{d}(\omega)$  na Eq. (8) para o som vindo do nível do chão (pneus dos veículos) estão relacionados aos sensores e posições de origem pela seguinte expressão, obtida a partir de uma avaliação de geometria simples:

$$\tau_i = \frac{l_i f_s}{v_s}, \quad (11)$$

onde  $v_s \approx 343$  m/s é a velocidade do som,  $f_s$  é a frequência de amostragem,

$$l_i = \sqrt{(S_x + x_i)^2 + (S_x \tan(\phi) + y_i)^2 + (S_x / \tan(\theta) + z_i)^2} \quad (12)$$

é a distância entre a fonte e cada microfone, e  $x_i$ ,  $y_i$  e  $z_i$  são as coordenadas do  $i$ -ésimo sensor em relação ao centro da matriz

de microfones. O DoA da fonte principal é então estimado fixando-se o ângulo de elevação no valor  $\theta = \arctan(S_x/h)$  e variando-se o ângulo de azimuth  $\phi$ . O valor de  $\phi$  para o qual a potência em uma faixa de frequências selecionada assume o maior valor corresponde à direção de chegada da fonte principal.

### III. PADRÃO DE DIRETIVIDADE

Após determinar a direção de chegada do sinal da fonte principal para cada quadro, conforme explicado na Seção II, definimos o ângulo de azimuth do formador de feixe  $\phi$  no valor correspondente e variamos o ângulo de elevação  $\theta$  em um intervalo predeterminado  $[\theta_{min}, \theta_{max}]$ , com  $\theta_{min} = \arctan(S_x/h)$  e  $\theta_{max} = 180^\circ - \theta_{min}$ . Para cada valor  $\theta$  neste intervalo, calculamos a potência de direção através da Eq. (10) em algumas bandas de frequência. Em seguida, normalizamos a potência do sinal em cada direção de observação pela distância quadrada da posição da fonte ao centro da matriz de microfones, que é dada por

$$D = \sqrt{S_x^2 + S_y^2 + (S_x / \tan(\theta))^2}, \quad (13)$$

onde  $S_y = S_x \tan(\phi)$ . Assim, o padrão de diretividade é obtida pela equação

$$DP_m = \frac{\sum_{k=k_{m,1}}^{k_{m,2}} P_k}{D^2}, \quad (14)$$

onde  $[k_{m,1}, k_{m,2}]$  são os índices da  $m$ -ésima faixa de frequências pré-selecionada.

### IV. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Foram realizados experimentos com dados gravados em ambiente controlado, com a passagem de um único veículo de cada vez e com baixo nível de ruído de fundo. A configuração do experimento é descrita a seguir, seguida da apresentação dos resultados obtidos aplicando-se os métodos propostos neste trabalho aos dados gravados usando o conjunto de microfones.

#### A. Configuração do Experimento

A aquisição de dados foi realizada no Instituto Nacional de Metrologia (INMETRO), que é um local silencioso (praticamente sem ruído de tráfego). O cenário do experimento realizado com o objetivo de adquirir as emissões sonoras veiculares consiste em 11 microfones dispostos num círculo de 0,25 m de diâmetro para registrar as informações de pressão sonora. Foram usados onze microfones (ao invés de doze igualmente espaçados) devido à limitação no módulo de aquisição de sinal disponível, que suportava apenas onze entradas. A frequência de amostragem foi  $f_s = 25600$  Hz. Os veículos passaram a uma distância de  $S_x = 2$  m da matriz de microfones circular, cujo centro estava a  $h = 1,2$  m acima do chão.

Quatro carros de passageiros diferentes foram usados nos testes do experimento, conforme detalhado na Tabela I. Cada teste consistiu na passagem de um carro ao lado do microfone a uma velocidade constante de cerca de 30, 50, 60 ou 70 km/h,

ou em velocidade acelerada. A velocidade exata foi medida com um dispositivo de GPS colocado dentro do veículo. Os testes de aceleração visaram coletar informações das emissões de ruído do motor, uma vez que o predomínio do ruído dos pneus foi observado em testes anteriores com velocidades constantes.

TABELA I  
VEÍCULOS UTILIZADOS NOS TESTES

| Carro ID | Modelo             | Tipo de Câmbio |
|----------|--------------------|----------------|
| 1        | Volkswagen Gol 1.0 | Manual         |
| 2        | Jeep Renegade 1.8  | Automático     |
| 3        | Mitsubishi ASX 2.0 | Automático     |
| 4        | Hyundai Creta 1.6  | Automático     |

Um exemplo ilustrativo do sinal adquirido durante a passagem de um veículo nos domínios de tempo e da STFT é mostrado na Fig. 2. Na Fig. 2 (a) verifica-se que um intervalo de observação de 10 s é adequado, enquanto na Fig. 2 (b) pode-se observar que a maior parte da energia do sinal está concentrada em frequências até cerca de 3 kHz.

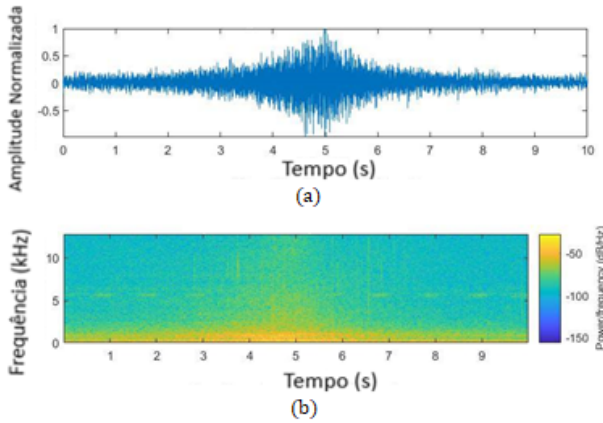


Fig. 2. Sinal gravado para o Carro ID 4 a 30 km/h: (a) amostras no tempo; (b) STFT.

### B. Estimativa da Direção de Chegada

Os métodos de estimativa da DoA baseados nos formadores de feixe descritos na Seção II foram aplicados aos dados gravados usando diferentes combinações de sinais dos microfones. A Figura 3 mostra as estimativas do ângulo de azimute para o Carro ID 4 a 50 km/h, as quais foram obtidas variando a direção de observação  $\phi$  com  $1^\circ$  de resolução para diferentes intervalos de tempo, empregando-se a janela de Hamming de comprimento 1024 com sobreposição de 75%. O ângulo de elevação foi fixado em  $\theta = \arctan(S_x/h)$ , correspondendo ao nível do piso. Para remover as estimativas de ruído, um filtro de mediana de tamanho 5 foi aplicado aos valores estimados. As Figs. 3 (a) e (b) mostram as estimativas das DoAs obtidas com o beamforming DAS e com o beamforming MVDR, respectivamente. As quatro curvas em cores diferentes foram obtidas a partir dos sinais dos microfones indicados nos diagramas da Fig. 3 (c). As linhas contínuas correspondem

às curvas teóricas obtidas a partir das velocidades medidas, considerando-se como referências o ponto médio do carro (em verde) e os pneus dianteiros ou traseiros (em preto). Pode-se

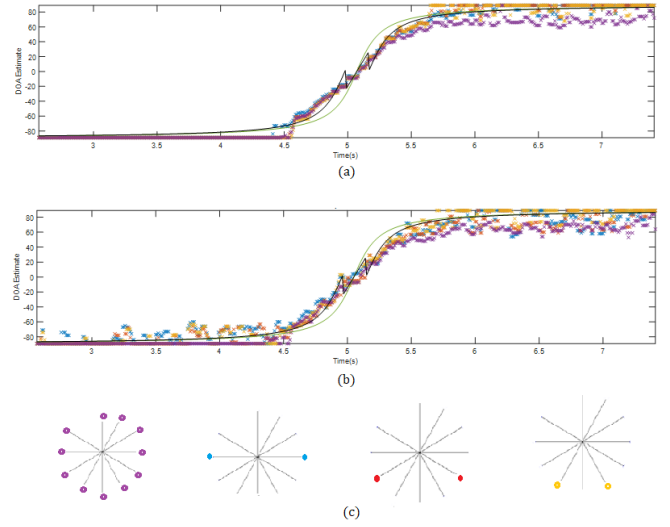


Fig. 3. Resultados da estimativa da DoA para o Carro ID 4 a 50 km/h: (a) DAS; (b) MVDR; (c) microfones usados para gerar as diferentes curvas.

observar a partir desses gráficos que ambas as abordagens DAS e MVDR são capazes de rastrear a direção da fonte principal (pneus do veículo), e que nenhuma vantagem é observada com o uso de mais de dois microfones. Outra conclusão é que o beamforming MVDR é capaz de detectar a direção do veículo mais cedo do que o beamforming DAS. Tal resultado deve-se à melhor seletividade da abordagem MVDR.

### C. Resultados do Padrão de Diretividade

Os padrões de diretividade para os veículos da Tabela I foram obtidos usando-se o procedimento descrito na Seção III. Para cada quadro de dados de 1024 amostras, o ângulo de azimute  $\phi$  foi definido com seu valor teórico (curva verde na Fig. 3) e o ângulo de elevação  $\theta$  foi variado de  $\theta_{min} = \arctan(S_x/h) = 59^\circ$  a  $\theta_{max} = 180^\circ - 59^\circ = 121^\circ$ . Três faixas de frequência foram analisadas: (i) de 200 Hz a 400 Hz; (ii) de 400 Hz a 800 Hz; (iii) de 800 Hz a 1600 Hz. Essas bandas de frequência contêm a maior parte da energia do sinal de som do veículo (ver Fig. 2). A potência do sinal para cada direção dos formadores de feixe foi obtida somando-se os valores calculados pela Eq. (10) para os bins de frequência que estavam dentro de cada uma das três faixas de frequência. O padrão de diretividade foi então obtido pela Eq. (14).

Os resultados obtidos para o Carro ID 2 em aceleração, com velocidade entre 0 e 35 km/h, usando os dois microfones verticais mais distantes são mostrados para as três faixas de frequência nas Figs. 4, 5 e 6, com as abordagens DAS e MVDR. A partir dessas figuras, pode-se observar que o beamformer MVDR foi capaz de localizar as principais fontes acústicas na direção vertical (quando o ângulo de elevação foi variado), enquanto o beamformer DAS não foi. Nas Figs. 5 e 6, componentes de alta potência na faixa de frequência de 400 a 1600 Hz vindos da direção correspondente à frente do carro podem ser observados, sendo atribuídas ao som do motor.

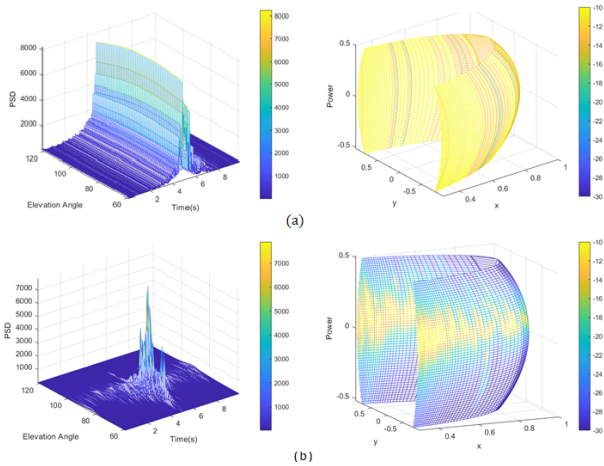


Fig. 4. Potência e Padrão de Direcionalidade para o Carro ID 2 em aceleração na faixa de 200 a 400 Hz: (a) DAS; (b) MVDR.

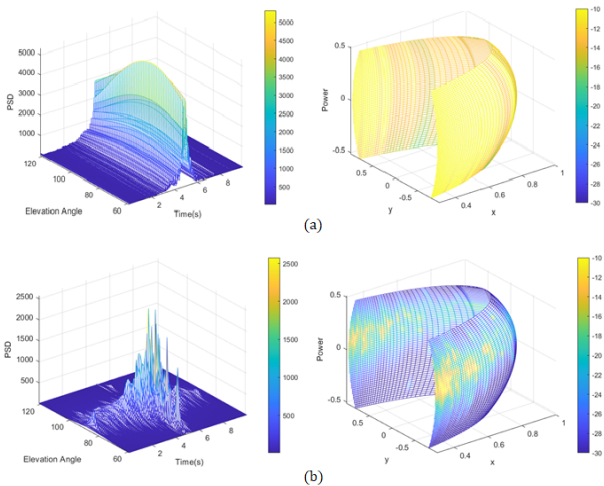


Fig. 5. Potência e Padrão de Direcionalidade para o Carro ID 2 em aceleração na faixa de 400 a 800 Hz: (a) DAS; (b) MVDR.

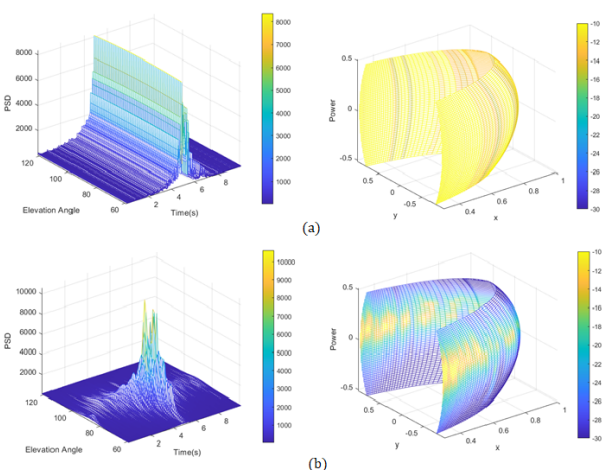


Fig. 6. Potência e Padrão de Direcionalidade para o Carro ID 2 em aceleração na faixa de 800 a 1600 Hz: (a) DAS; (b) MVDR.

## V. CONCLUSÕES

Neste trabalho, apresentamos técnicas de processamento de sinais desenvolvidas para serem utilizadas em um sistema

de auralização para simulação acústica de tráfego. Construir um banco de dados robusto, contendo fontes veiculares de diversos tipos movendo-se em velocidades diferentes, que será a próxima etapa deste trabalho, é necessário para um desempenho consistente do sistema para uma variedade de cenários. A estimativa da direção de chegada da fonte principal foi investigada usando algoritmos baseados em formadores de feixes (*beamformers*), com dados de diferentes combinações de microfones. Os testes foram realizados com uma matriz de microfones omnidirecionais com disposição circular em ambiente controlado. O padrão de diretividade de cada ruído veicular foi obtido por filtragem espacial, com os formadores de feixe DAS e MVDR, tendo a técnica MVDR apresentado desempenho superior.

## REFERÊNCIAS

- [1] W. H. Organization and Others, "Burden of disease from environmental noise: Quantification of healthy life years lost in Europe," in *Burden of disease from environmental noise: quantification of healthy life years lost in Europe*. JRC, 2011, p. 126.
- [2] M. Vorländer, *Auralization: fundamentals of acoustics, modelling, simulation, algorithms and acoustic virtual reality*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [3] D. Ouis, "Annoyance from road traffic noise: a review," *Journal of Environmental Psychology*, vol. 21, no. 1, pp. 101–120, 2001.
- [4] V. Cevher, R. Chellappa, and J. H. McClellan, "Vehicle speed estimation using acoustic wave patterns," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 57, no. 1, pp. 30–47, Jan. 2009.
- [5] R. Pieren, "Auralization of environmental acoustical sceneries - synthesis of road traffic, railway and wind turbine noise," Ph.D. dissertation, Delft University of Technology, Zurich, Switzerland, Sep. 2018.
- [6] D. H. Johnson and D. E. Dudgeon, *Array Signal Processing: Concepts and Techniques*, ser. Prentice-Hall Signal Processing Series. New York: P T R Prentice Hall, Feb. 1993.
- [7] P. Marmaroli, J. Odobez, X. Falourd, and H. Lissek, "A bimodal sound source model for vehicle tracking in traffic monitoring," *European Signal Processing Conference*, 01 2011.
- [8] G. D. Rocha, F. R. Petraglia, J. C. B. Torres, and M. R. Petraglia, "Direction of arrival estimation of acoustic vehicular sources," in *23rd International Congress on Acoustics (ICA 2019)*, 09 2019.
- [9] F. Meng, "Modeling of moving sound sources based on array measurements," Ph.D. dissertation, RWTH Aachen, Aachen, Germany, Sep. 2018.
- [10] G. Doblinger, "Localization and tracking of acoustical sources," in *Topics in Acoustic Echo and Noise Control*, ser. Signals and Communication Technology, E. Hänsler and G. Schmidt, Eds. Springer Berlin Heidelberg, May 2006, ch. 4, pp. 91–122.
- [11] W. Liu and S. Weiss, *Wideband Beamforming: Concepts and Techniques*, ser. Wireless Communications and Mobile Computing. West Sussex: Wiley, May 2010.
- [12] S. Vorobyov, "Principles of minimum variance robust adaptive beamforming design," *Signal Processing*, vol. 93, no. 1, pp. 3264–3277, 2013.