

Área: Inovação | **Tema:** Temas Emergentes em Inovação

Inovação e tecnologia: o primeiro sistema de monitoramento sonoro baseado em microfones digitais do Brasil

Innovation and technology: the first sound monitoring system based on digital microphones in Brazil

William D'andrea Fonseca e Felipe Ramos De Mello

RESUMO

A rápida urbanização e a poluição sonora resultante desse processo destacam a necessidade de controlar ruídos nas metrópoles brasileiras, dado seu impacto na qualidade de vida e saúde pública. O monitoramento acústico é vital para gerenciar esse cenário. Este estudo apresenta um sistema de monitoramento inovador e custo-efetivo, focado no Nível de Pressão Sonora Contínuo Equivalente (Leq). Integrando tecnologias avançadas, almeja-se definir um novo padrão para o monitoramento sonoro no Brasil via microfones digitais.

Palavras-Chave: acústica, som, microfones digitais, monitoramento

ABSTRACT

A acelerada urbanização nas grandes cidades brasileiras trouxe consigo uma complexidade sonora que impacta diretamente a qualidade de vida e a saúde pública. O controle do ruído urbano tem sido um desafio crescente nesse cenário. Contudo, como monitorar e gerenciar efetivamente, de forma economicamente viável, essa paisagem sonora em constante evolução? O objetivo deste estudo é introduzir um sistema inovador de monitoramento sonoro custo-efetivo (via microfones digitais), focado na métrica do Nível de Pressão Sonora Contínuo Equivalente (Leq).

Keywords: acoustics, sound, digital microphones, monitoring

Inovação e tecnologia: o primeiro sistema de monitoramento sonoro baseado em microfones digitais do Brasil

1. Introdução

À medida que cidades e centros urbanos se expandem, a poluição sonora emerge não apenas como um incômodo, mas como uma ameaça tangível à saúde pública. A previsão da Organização das Nações Unidas, de que em 2050, dois terços da população mundial residirão em centros urbanos (UN News, 2022), intensifica a urgência por um planejamento urbano que incorpore práticas sustentáveis, especialmente na gestão do ruído acústico. Assim, o monitoramento sonoro não é apenas relevante, mas vital, fornecendo dados cruciais para a formulação de soluções inovadoras e para a avaliação contínua da eficácia de tais estratégias.

Tradicionalmente, a avaliação de ruído tem sido realizada sob demanda, por especialistas munidos de *medidores de nível de pressão sonora* (ou *sonômetros*) padronizados. Essa abordagem, ainda que consagrada, apresenta desafios como custos substanciais, limitações na amplitude de observação e uma incapacidade de contemplar as nuances da paisagem sonora ao longo do tempo. A evolução tecnológica aponta para sistemas autônomos de custo reduzido como a resposta a esses desafios. Notavelmente, os microfones micro-eleto-mecânicos (MEMS) digitais, com seu perfil compacto, eficiência energética e desempenho acústico adequado (especialmente em modelos mais modernos), se destacam como a solução emergente.

No continente europeu, estimulados pela Diretriz de Ruído Ambiental da União Europeia (European Commission, 2023) — a principal lei da União Europeia relacionada à poluição sonora —, diversos projetos e trabalhos estão sendo executados, como os exemplos pode-se citar *Dynamap Project* (2023), *LIFE MONZA Project* (2023) e *CENSE Project* (2023). Este movimento é evidenciado pela recente publicação da revista *Sensors* (MDPI) em sua edição especial sobre o tema (Alsina-Pagès, Bellucci e Zambon, 2020), com um enfoque para a revisão escrita por Picaut *et al.* (2020). No Brasil, identifica-se um vasto horizonte para inovação e expansão neste segmento.

Dentro deste cenário, o presente estudo destaca o *design* e avaliação de um sistema de monitoramento sonoro baseado em microfones MEMS digitais e plataforma embarcada. O renomado (*conteúdo omitido*), abrigado pela (*conteúdo omitido*), não apenas desenvolve pesquisas voltadas para novas tecnologias de medição e monitoramento acústico mas também se dedica à visão de um futuro sustentável em termos ambientais. Com uma trajetória ímpar de mais de oito anos na vanguarda tecnológica, o grupo, sob a liderança do professor (*conteúdo omitido*), consolidou sua posição pioneira em 2021 com a publicação de um artigo que apresentou, de forma inovadora, a *prova de conceito* do primeiro sistema de monitoramento sonoro baseado em microfones digitais no Brasil (*Conteúdo omitido*, 2021).

Com trabalhos já publicados com microfones analógicos desde 2020 (*Conteúdo omitido*, 2020), o passo em direção aos digitais possibilitou ainda mais a redução de consumo energético e de produção de unidades confiáveis. Os algoritmos computacionais desenvolvidos foram meticulosamente testados em conformidade com as normas relevantes. O desempenho acústico do protótipo testado demonstrou precisão notável ao ser confrontado com um sonômetro de Classe 1 (referência na acústica), apresentando uma margem de erro de apenas $\pm 0,5$ dB na faixa de frequências de 60 Hz a 12,5 kHz. Além disso, em um salto evolutivo em 2022 (*Conteúdo omitido*, 2022a), visando aprimorar a interação e utilidade para o usuário, foi concebido um aplicativo dedicado para *smartphones*. Essa inovação não apenas facilita o controle remoto do dispositivo, mas também proporciona uma interface intuitiva para a visualização de dados em tempo real e para o acesso *wireless* às informações armazenadas no cartão de memória do protótipo.

A proficiência acumulada no tema culminou, em 2022, na publicação de um artigo que revisa e destaca os aspectos cruciais da tecnologia contemporânea. Esse trabalho pioneiro estabeleceu uma linha guia de conceitos que tem sido amplamente adotada e copiada por outros especialistas e construtores brasileiros (*Conteúdo omitido*, 2022b).

2. Elementos de *hardware*

No protótipo abordado neste artigo, empregou-se uma sinergia entre o microfone MEMS digital e as plataformas Teensy 4.0 e ESP32. O ESP32 destaca-se como um microcontrolador dotado de interfaces de comunicação sem fio, abrangendo Wi-Fi e Bluetooth (Yichone, 2017). Em contrapartida, o Teensy 4.0, compatível com Arduino, apresenta uma robustez computacional notável, compreendendo uma unidade de cálculo em ponto flutuante (FPU) e uma biblioteca nativa cuidadosamente concebida para o processamento de sinais de áudio (PJRC – P. J. Stoffregen, 2021).

Microfones MEMS, transdutores acústicos moldados diretamente em *chips* semicondutores, representam uma maravilha da miniaturização tecnológica. Sua abordagem de fabricação engendra dispositivos caracterizados por seu custo reduzido, consumo energético eficiente e dimensões compactas. Afinado com essas vantagens, é possível consolidar, no mesmo conjunto, o circuito condicionador de sinal e um conversor analógico-digital (ADC). Essas possibilidades têm catalisado uma diversidade de desenvolvimentos, desde prototipagens singelas até implementações industriais em larga escala. Não é raro, por exemplo, que aparelhos *smartphone* sejam equipados com um ou múltiplos microfones MEMS. Um aprofundamento sobre a tecnologia e suas inúmeras aplicações pode ser explorado nas obras de Lewis (2013), Malcovati e Baschirotto (2018) e Pflug e Krischker (2017).

Arduino emerge como uma plataforma de código aberto voltada para microcontroladores (MCU), proporcionando uma maneira intuitiva e versátil para conceber e materializar dispositivos eletrônicos diversificados. Sua linguagem, fundamentada em C++, é enriquecida por uma vasta coleção de bibliotecas, concebidas para atender propósitos variados e, assim, otimizar o processo de desenvolvimento de *software*. Adicionalmente, placas desse tipo possuem a capacidade de interagir com uma gama extensa de sensores e dispositivos disponíveis comercialmente, amplificando as fronteiras da prototipagem. Para uma compreensão mais detalhada, recomenda-se a consulta ao *site* oficial (Arduino, 2021).

3. Sistema de monitoramento de ruído

Medidores de nível de pressão sonora (MNPS), também conhecidos como sonômetros, são instrumentos padronizados voltados à mensuração de níveis sonoros, desempenhando uma função vital no monitoramento acústico. A pressão sonora é originada a partir de variações na pressão atmosférica de um meio, geralmente o ar. Considerando que essas flutuações ocorrem dinamicamente ao longo do tempo, são frequentemente descritas pelo seu *valor eficaz* (ou RMS). A magnitude dessa pressão sonora eficaz está intrinsecamente relacionada ao conteúdo energético de uma onda acústica, sendo fundamental para o cálculo do Nível de Pressão Sonora (NPS), que é calculado por

$$\text{NPS} = 10 \log_{10} \left(\frac{p_{\text{rms}}}{p_0} \right)^2 \text{ dB} \quad (1)$$

em que $p_0 = 20 \mu\text{Pa}$ é a pressão de referência e p_{rms} a pressão eficaz medida. A escala decibel é utilizada pois permite compactar a grande faixa de pressões sonoras que o ser humano é capaz de detectar (de micro à dezenas de Pascals). Por fim, a pressão de referência (referente ao limiar auditivo @ 1 kHz) define o 0 dB, ou seja, é a mínima pressão sonora que provoca a *sensação auditiva*.

Valores de NPS são comumente avaliados utilizando uma *ponderação temporal*, como *Fast* (F, 125 ms) ou *Slow* (S, 1 s). Esse tipo de ponderação define tanto o período de integração quanto a velocidade de resposta do *sistema de monitoramento* (ou sonômetro) à variações de pressão sonora. Ademais, também é comum aplicar ao sinal uma *ponderação em frequência*, de modo a contemplar as diferentes sensibilidades da audição humana ao longo do espectro — as curvas comumente utilizadas são a A, C e Z (zero, ou sem ponderação).

Outra grandeza avaliada com um MNPS é o Nível de Pressão Sonora Contínuo Equivalente (L_{eq}), que mensura a energia sonora ao longo de um período de tempo, representando-a por meio de um valor único (em dB). O L_{eq} é dado por:

$$L_{\text{eq}} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{T} \int_0^T \frac{p^2(t)}{p_0^2} dt \right), \quad (2)$$

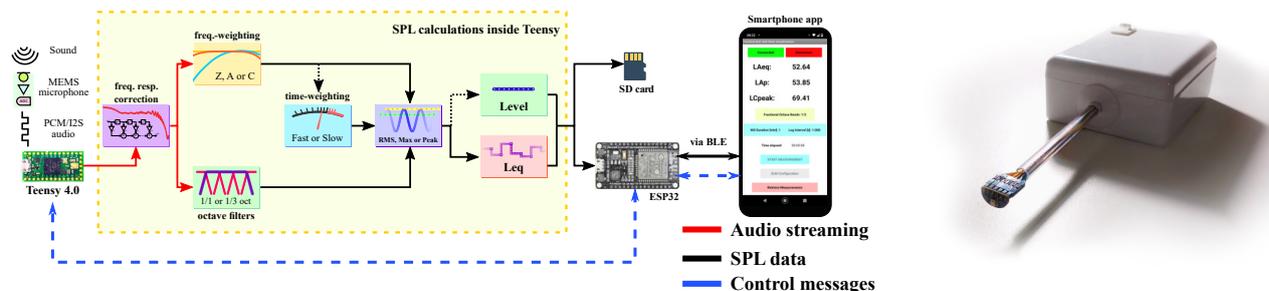
em que T é o período de avaliação. Caso a ponderação temporal não esteja envolvida, o NPS e o L_{eq} são muito semelhantes. Nesse caso, a diferença é que o L_{eq} é integrado ao longo de períodos maiores em relação ao NPS. Finalmente, o Nível de Pressão Sonora Contínuo Equivalente é comumente avaliado com alguma ponderação em frequência (e denotado como L_{Aeq} e L_{ACeq} , por exemplo). Para mais informações sobre o tema, recomenda-se os livros-texto de Jacobsen e Juhl (2013), Pierce (2019) e Bies (2023).

A cadeia de sinais do protótipo para o sistema de monitoramento de ruído está ilustrada na Figura 1 e compreende um microfone MEMS digital, uma placa Teensy 4.0 (responsável pela aquisição dos sinais sonoros e cálculo do NPS), um módulo ESP32 (responsável pela comunicação sem fio), um módulo para cartão SD (para armazenamento de dados) e uma bateria portátil. O dispositivo é capaz de medir NPS e L_{eq} considerando as ponderações temporal e em frequência. Filtros passa-banda também foram implementados, de modo a permitir análise em bandas de 1/1 e 1/3 de oitava. Ademais, o sistema possui conectividade sem fio (via Bluetooth e Wi-Fi), com a qual é possível realizar seu controle remotamente, bem como transmitir dados.

As ponderações temporais e em frequência foram validadas de acordo com os limites de aceitação descritos nas normas IEC 61672:2013, Partes 1 e 2 (IEC, 2013a; IEC, 2013b). Ainda, a implementação dos filtros passa-banda em 1/1 e 1/3 de oitava foram validados seguindo as diretrizes das normas IEC 61260:1-2014 e IEC 61260:2-2016 (IEC, 2014; IEC, 2016). Por fim, testes de performance acústica foram conduzidos, comparando o desempenho do protótipo com um sonômetro de Classe 1 (Bruel and Kjaer Type 2240). Como resultado, observou-se erros entre $\pm 0,5$ dB na faixa de frequências entre 60 Hz e 12,5 kHz (observe a Figura 2). Para mais informações sobre a metodologia e resultados, consulte o artigo de (Conteúdo omitido, 2021).

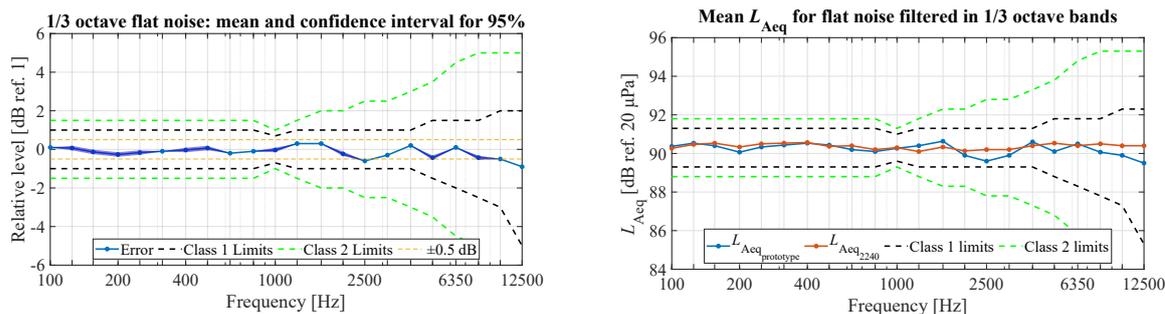
Considerando o desempenho do protótipo para longos períodos de funcionamento, realizou-se quatro medições em cenários distintos: um *shopping center* (durante 30 minutos); a fachada de uma residência (durante 1 hora, para os períodos da manhã e noite); e um quarto (durante 8 horas).

Figura 1 – À esquerda, a cadeia de sinais do sistema de monitoramento. À direita, o protótipo montado (conteúdo omitido).



Fonte: autores.

Figura 2 – Resultados da comparação de desempenho acústico entre o protótipo e um sonômetro Classe 1, considerando um *flat-noise* filtrado em bandas de terço de oitava como sinal de excitação (conteúdo omitido).



Fonte: autores.

O dispositivo foi capaz de operar continuamente em todos os cenários considerados, com todos os dados armazenados com sucesso no cartão SD.

4. Aplicativo de *smartphone*

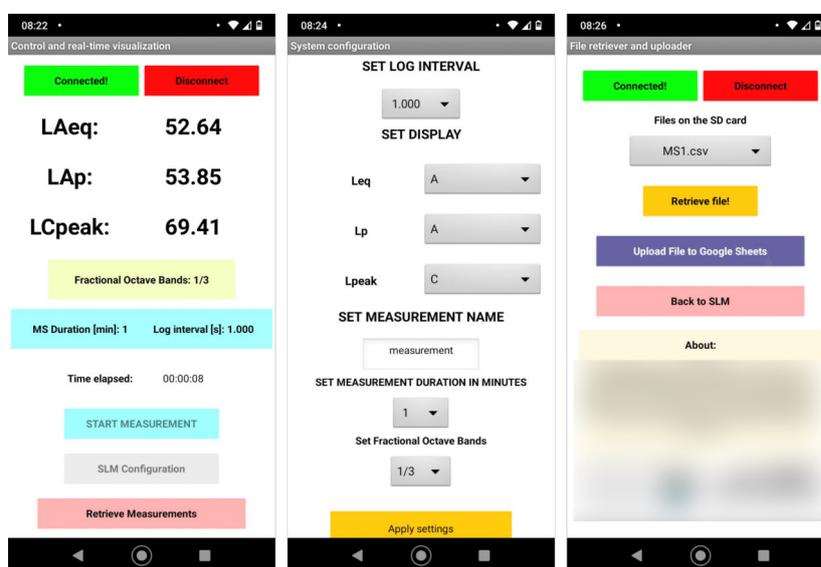
De modo a proporcionar um controle remoto do protótipo, bem como visualizar dados em tempo real e realizar o *download* dos arquivos de medição salvos no cartão SD, um aplicativo de *smartphone* foi desenvolvido. O aplicativo é composto por três telas (observe a Figura 3):

- **Tela 1:** visualização de dados em tempo real e inicialização de uma medição;
- **Tela 2:** configuração da medição; e
- **Tela 3:** *download* de dados.

Para mais informações a respeito do aplicativo, consulte o artigo de (Conteúdo omitido, 2022a), recentemente publicado em Glasgow, Reino Unido — a apresentação em vídeo está disponível no YouTube por meio do link (conteúdo omitido).

(conteúdo omitido)

Figura 3 – Telas do aplicativo, da esquerda para a direita, as Telas 1, 2 e 3, respectivamente (conteúdo omitido).



Fonte: autores.

5. Considerações finais

Este resumo expandido apresenta um marco na pesquisa acústica no Brasil, fruto de anos de dedicação em sistemas embarcados, instrumentação acústica e processamento de sinais. O protótipo desenvolvido se destaca pelo equilíbrio entre alto desempenho e viabilidade econômica, consolidando o primeiro sistema de monitoramento sonoro baseado em microfones digitais do Brasil. Prospectando avanços, refinamentos na carcaça do dispositivo e em sua resposta acústica serão aperfeiçoados. Isso será alcançado explorando microfones MEMS de ponta personalizados, encapsulados em cápsulas de 1/2 ou 1/4 polegadas, alinhando-se aos padrões da indústria. Ademais, busca-se desenvolver algoritmos mais robustos para transmissão de dados, integrados com um servidor *web* para monitoramento em tempo real ao longo de uma área de interesse (considerando várias unidades trabalhando em paralelo). Por fim, este trabalho tem grande potencial de beneficiar a sociedade ao oferecer uma solução custo-efetiva e de alta qualidade para o monitoramento de ruído, habilitando gestores de cidades, arquitetos, engenheiros e urbanistas a construir soluções otimizadas para o controle e mitigação do ruído urbano.

Agradecimentos

(conteúdo omitido)

Referências

- ALSINA-PAGÈS, Rosa Ma; BELLUCCI, Patrizia; ZAMBON, Giovanni. Smart wireless acoustic sensor network design for noise monitoring in smart cities. *Sensors*, MDPI AG, v. 20, n. 17, p. 4765, aug 2020. doi: [10.3390/s20174765](https://doi.org/10.3390/s20174765).
- ARDUINO. *About Arduino*. [S.l.], 2021. Acesso em setembro de 2023. Disponível em: <https://www.arduino.cc/en/about>.
- BIES, David. *Engineering noise control: theory and practice*. 6. ed. Boca Raton, FL, EUA: CRC Press/Taylor & Francis, 2023. doi: [10.1201/9780367814908](https://doi.org/10.1201/9780367814908). ISBN 978-0367814908.
- CENSE Project. *CENSE Project — Characterization of urban sound environments*. [S.l.], 2023. Acesso em setembro de 2023. Disponível em: <https://cense.ifsttar.fr/en/>.
- Conteúdo omitido. (*conteúdo omitido*). In: (*conteúdo omitido*). [S.l.: s.n.], 2020.
- Conteúdo omitido. (*conteúdo omitido*). In: (*conteúdo omitido*). [S.l.: s.n.], 2021.
- Conteúdo omitido. (*conteúdo omitido*). In: (*conteúdo omitido*). [S.l.: s.n.], 2022.
- Conteúdo omitido. (*conteúdo omitido*). In: (*conteúdo omitido*). [S.l.: s.n.], 2022.
- DYNAMAP PROJECT. *Dynamic Acoustic Mapping — development of low-cost sensors networks for real-time noise mapping*. [S.l.], 2023. Acesso em setembro de 2023. Disponível em: <https://life-dynamap.eu/>.
- EUROPEAN COMMISSION. *Environmental Noise Directive*. [S.l.], 2023. Acesso em setembro de 2023. Disponível em: https://environment.ec.europa.eu/topics/noise/environmental-noise-directive_en.
- IEC. *Electroacoustics – Sound level meters – Part 1: Specifications*. [S.l.], 2013. *International standard*.
- IEC. *Electroacoustics – Sound level meters – Part 2: Pattern evaluation tests*. [S.l.], 2013. *International standard*.
- IEC. *Electroacoustics – Octave-band and fractional-octave-band filters – Part 1: Specifications*. [S.l.], 2014. *International standard*.
- IEC. *Electroacoustics – Octave-band and fractional-octave-band filters – Part 2: Pattern-evaluation tests*. [S.l.], 2016. *International standard*.
- JACOBSEN, Finn; JUHL, Peter Moller. *Fundamentals of General Linear Acoustics*. [S.l.]: Wiley, 2013.
- LEWIS, Jerad. *Analog and Digital MEMS Microphone Design Considerations*. 2013. Analog Devices, Technical Article (MS-2472).
- LIFE MONZA PROJECT. *MONZA — Methodologies for Noise low emission Zones introduction And management*. [S.l.], 2023. Acesso em setembro de 2023. Disponível em: <https://www.isprambiente.gov.it/en/projects/physical-agents/life-monza-methodologies-for-noise-low-emission-zones-introduction-and-management>.
- MALCOVATI, P.; BASCHIROTTI, A. The evolution of integrated interfaces for MEMS microphones. *Micromachines*, v. 9, n. 7, p. 1–20, n. 323, 2018. ISSN 2072-666X. doi: [10.3390/mi9070323](https://doi.org/10.3390/mi9070323).
- PFLUG, Patrick von; KRISCHKER, Detlef. Aspects of the use of MEMS microphones in phased array systems. In: *46th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering – Internoise 2017*. Hong Kong, China: [s.n.], 2017. p. 5983–5993. ISSN 0736-2935. Disponível em: <https://bit.ly/int2017-mems>.
- PICAUT, Judicaël; CAN, Arnaud; FORTIN, Nicolas; ARDOUIN, Jeremy; LAGRANGE, Mathieu. Low-Cost Sensors for Urban Noise Monitoring Networks—A Literature Review. *Sensors*, MDPI AG, v. 20, n. 8, p. 2256, apr 2020. doi: [10.3390/s20082256](https://doi.org/10.3390/s20082256).
- PIERCE, Allan D. *Acoustics – An Introduction to Its Physical Principles and Applications*. [S.l.]: Springer International Publishing, 2019. doi: [10.1007/978-3-030-11214-1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-11214-1). ISBN 978-3030112134.
- PJRC – P. J. Stoffregen. *Teensy 4.0 Development Board*. 2021. Official Website. Disponível em: <https://www.pjrc.com/store/teensy40.html>.
- UN News. *Around 2.5 billion more people will be living in cities by 2050, projects new UN report*. [S.l.], 2022. Access in August 2022. Disponível em: <https://bit.ly/people-cities2050>.
- YICHONE. *ESP8266 ESP32*. [S.l.], 2017. Disponível em: <https://github.com/SmartArduino/SZDOITWiki/wiki/ESP8266---ESP32>.