

FIA 2020/22

XII CONGRESSO/CONGRESO IBEROAMERICANO DE ACÚSTICA
XXIX ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA - SOBRAC

Florianópolis, SC, Brasil

Sonômetro de baixo custo baseado em microfone digital para aplicações em acústica de salas

Corrêa, S. M.¹; Melo, V. S. G.^{1,2}

¹ Engenharia Acústica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil, stefanomastella@hotmail.com

² Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil, viviane.melo@ufsm.br

Resumo

Este trabalho tem como objetivo a confecção de um medidor de nível de pressão sonora de baixo custo para atendimento às necessidades de engenheiros recém-formados e entusiastas da área da acústica. Trata-se de uma adaptação do dispositivo, desenvolvido no trabalho *Digital Microphone and Arduino Compatible Microcontroller: an Embedded System for Noise Monitoring*, de Mello *et al.*, para medições de tempo de reverberação e ruído residual em salas. O aparelho consiste em uma carcaça feita em impressora 3D, alguns componentes eletrônicos (microfone MEMS, microcontrolador Teensy 4.0 e conectores) e um adaptador para calibração relativa. O código de aquisição e processamento de dados é feito em *Python*, tomando como base o *PyTTA*, que é uma *toolbox* (desenvolvida por pesquisadores do Curso de Engenharia Acústica da UFSM) que conta com várias ferramentas de aquisição de sinais, processamento e plotagem de dados. A averiguação da confiabilidade do medidor é feita em câmara reverberante e em uma sala de aula, comparando o seu desempenho com um modelo comercial de tipo 1 (B&K Type 2270). Com o protótipo, são medidos os tempos de reverberação das duas salas pelo método da resposta impulsiva integrada, em contraste com o método de ruído interrompido utilizado pelo B&K 2270, categorizando, portanto, uma comparação de *hardware* e de processamento de sinais. A funcionalidade de medição de nível de pressão sonora é avaliada medindo sinais a partir de ruído branco e varredura em frequência emitidos por uma fonte onidirecional dentro da câmara reverberante. Na sala de aula é medido o ruído residual com as duas instrumentações. Ao todo, são comparados oito microfones MEMS modelo MSM261S4030H0, com o intuito de analisar os desvios das respostas de cada um, já que eles são fabricados em larga escala. Ao final, são apresentados os resultados obtidos para o desempenho da instrumentação proposta na pesquisa.

Palavras-chave: microfone MEMS, tempo de reverberação, nível de pressão sonora, acústica de salas, Teensy.

PACS: 43.20.Ye, 43.55.Mc, 43.58.Fm, 43.58.-e.

Low-cost sound level meter using MEMS microphone for room acoustics purposes

Abstract

This work aims to make a low-cost sound pressure level meter to meet the needs of newly graduated engineers and acoustics enthusiasts. The device is an adaptation of the prototype developed by Mello *et al.*, in the article entitled *Digital Microphone and Arduino Compatible Microcontroller: an Embedded System for Noise Monitoring*, for measurements of reverberation time and background noise. It consists of a 3D printer case, electronic components (MEMS microphone, Teensy 4.0 microcontroller and connectors), and an adapter for relative calibration. The data acquisition and processing code are written in Python, based on PyTTA, which is a toolbox (developed by researchers from the Acoustical Engineering course at UFSM) that has several signal acquisition, processing and plotting tools. The reliability of the prototype is checked in a reverberant room and a classroom, comparing its performance with a type 1 sound level meter (B&K Type 2270). With the prototype, the reverberation times of the two rooms are measured by the integrated impulse response method, in contrast to the interrupted noise method of the B&K 2270, thus categorizing a comparison of hardware and signal processing. The sound pressure level measurement functionality is evaluated by measuring white noise and sinusoidal signals emitted by an omnidirectional source inside the reverberant chamber. In the classroom, the background noise is measured with the two instruments. Altogether, eight MEMS microphones model MSM261S4030H0 are compared to analyze the difference in the responses of each one, since they are manufactured on a large scale. In the end, the results obtained for the performance of the instrumentation proposed in the research are presented.

Keywords: MEMS microphone, reverberation time, sound pressure level, room acoustics, Teensy.



1. INTRODUÇÃO

A instrumentação usada em medições acústicas costuma ter preço elevado. Isto se dá porque a criação e a fabricação dessas tecnologias exige a aplicação de técnicas extremamente sofisticadas. Esse alto custo pode ser um impeditivo a pessoas que não possuem recursos financeiros para aquisição de equipamentos de ponta. O medidor de pressão sonora, equipamento essencial da engenharia acústica, não foge à regra. Existe, portanto, uma necessidade de buscar alternativas de menor preço que possuam desempenho semelhante à instrumentação comercial.

Nesse contexto, já existem propostas de sonômetros de baixo custo que funcionam a partir do uso de microfones de diversos tipos. Como é o caso do trabalho de Jacomussi *et al.* [1], que desenvolveu um protótipo usando microfones de eletreto ligados a um Raspberry Pi¹. Há ainda um tipo ainda pouco explorado: trata-se do microfone *MEMS*, sigla para *Micro-Electro-Mechanical Systems* ou, em português, Sistemas Microeletromecânicos. Mello *et al.* [2] desenvolveu um sonômetro usando microfone *MEMS* para monitoramento de ruído ambiental, sendo uma das inspirações para o desenvolvimento do presente trabalho. Aqui pretende-se expandir a documentação existente sobre essa tecnologia em aplicações de medições acústicas, mais especificamente, no contexto de acústica de salas.

Neste estudo foi desenvolvido um protótipo com peças impressas a partir de um modelo 3D, onde os componentes são montados de forma compacta. Em linguagem de programação *Python*, foram escritos códigos para aquisição e processamento de sinais. A base para essa parte computacional foi desenvolvida a partir do *PyTTa toolbox* [3], que permite, entre outras coisas, medição de sinais acústicos e de vibração, geração de sinais senoidais, geração de *sweeps* exponenciais, cálculo de níveis de pressão sonora, cálculo de tempo de reverberação e plotagem de dados.

O dispositivo deste estudo foi testado em dois contextos diferentes. O primeiro em câmara reverberante, onde o controle de variáveis é maior.

E o segundo em uma sala de aula, situação de uso para a qual o protótipo foi desenvolvido. Em ambos os casos foi feita a comparação de resultados com um sonômetro comercial tipo 1, o B&K Type 2270.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção são apresentados alguns conceitos teóricos importantes sobre pressão sonora e tempo de reverberação, assim como alguns comentários a respeito dos aparatos tecnológicos que constituem o sistema de medição desenvolvido neste trabalho.

2.1 Nível de pressão sonora e nível equivalente

O nível de pressão sonora é uma forma de quantificar as ondas sonoras em termos de oscilações de pressão do ar (compressão e rarefação). O ser humano, em média, consegue perceber essas mudanças na pressão do ar a partir de $20 \mu\text{Pa}$ para a frequência de 1000 Hz [4]. Além disso, as máximas variações de pressão suportáveis chegam a 20 Pa, uma grande variação que exige uma forma de descrever numericamente o fenômeno em escala logarítmica. O nível de pressão sonora é, portanto, condicionado pela fisiologia humana e seu cálculo se dá de acordo com

$$\text{NPS} = 10 \log \left(\frac{p_{\text{rms}}}{20 \mu\text{Pa}} \right)^2 \text{ dB}, \quad (1)$$

em que p_{rms} é a média quadrática (*root mean square*) do valor de pressão e $20 \mu\text{Pa}$ o valor de referência para o limiar da audição, citado anteriormente.

Outra métrica importante é o nível de pressão sonora equivalente, visto na Equação 2, que descreve qual é o nível médio durante um certo período. É uma forma de descrever, em um único valor, qual o nível equivalente apesar das flutuações de pressão que podem ter ocorrido no decorrer do tempo.

$$L_{\text{eq}} = 10 \log \left(\frac{1}{T} \int_0^T 10^{\frac{\text{NPS}(t)}{10}} dt \right) \text{ dB}. \quad (2)$$

2.2 Curvas de ponderação

A audição humana não é igual para todas as frequências do espectro sonoro. Isso quer dizer

¹Mini-computador com componentes integrados que pode rodar sistemas operacionais como o Ubuntu e Windows 10 IoT.

que o nível de pressão sonora sem qualquer modificação não corresponde à forma como seres humanos escutam realmente. Para realizar essa correção foram criadas as curvas de ponderação, que nas palavras de Bistafa [5], “são utilizadas para modificar o espectro sonoro de acordo com a resposta do sistema auditivo às diferentes frequências contidas no som”.

As curvas de ponderação mais comumente utilizadas são as curvas A, C e Z. Cada uma representa um cenário distinto.

Curva A: corresponde à resposta do sistema auditivo aos níveis de pressão sonora mais comuns no cotidiano das pessoas (níveis moderados), sendo indicado na maioria das normas e legislações relacionadas à avaliação de ruído.

Curva C: simula o comportamento do sistema auditivo ao receber altos níveis de pressão sonora, sendo, portanto, empregado ao lidar com ambientes extremamente ruidosos, avaliação de sons de impacto e em algumas normas em relação ao ambiente de trabalho.

Curva Z: ponderação totalmente plana, ou seja, não modifica o espectro de frequências.

As curvas de ponderação A, C e Z podem ser vistas na Figura 1.

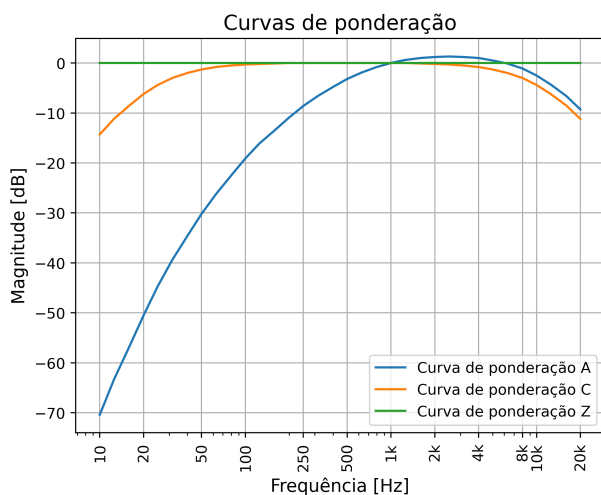


Figura 1: Curvas de ponderação A, C e Z conforme a norma IEC 61672-2013 [6].

2.3 Tempo de reverberação

O tempo de reverberação está relacionado às energias acústicas dentro do ambiente. A densidade de energia acústica relaciona a energia total do

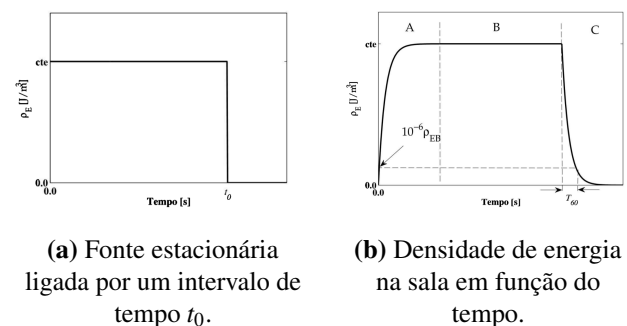
sistema, i.e., à soma da energia acústica cinética com a energia acústica potencial em relação ao volume do ambiente. A Equação 3 demonstra como é feito o cálculo de $\rho_E(t)$.

$$\rho_E(t) = \frac{E_c(t) + E_p(t)}{V_0}, \quad (3)$$

em que ρ_E é a densidade de energia acústica total no sistema, E_c e E_p são as energias acústicas cinética e potencial, e V_0 o volume da sala.

Quando uma fonte sonora emite um ruído estacionário no interior de um ambiente, leva-se um tempo até que a energia emitida e a energia absorvida entrem em equilíbrio. A isto dá-se o nome de Ataque [4]. Após esse período ocorre o estado estacionário, onde a densidade energética se mantém constante até que a fonte seja desligada. Da mesma forma que a densidade energética leva um tempo para se estabilizar no ataque, a mesma leva um tempo para decair quando a fonte é desligada.

A Figura 2 (a) mostra o intervalo de tempo em que a fonte fica ligada. Note que a densidade energética é constante durante o tempo em que o som é emitido, porém, assim que a fonte é desligada, esse valor constante cai para zero imediatamente. Por outro lado, na Figura 2 (b), é possível observar as três fases da densidade de energia acústica em campo difuso. As três fases são, respectivamente, ataque (no gráfico denominada de A), estado estacionário (denominada região B) e decaimento (denominada região C). O tempo de reverberação é o tempo que leva até a densidade energética cair um milionésimo do valor constante da região B.



(a) Fonte estacionária ligada por um intervalo de tempo t_0 .

(b) Densidade de energia na sala em função do tempo.

Figura 2: Comportamento de um fonte sonora constante e densidade de energia em campo difuso (extraído de Brandão [4]).



Experimentalmente, o tempo de reverberação pode ser medido de diferentes maneiras, como se verá na seção de metodologia do trabalho. No entanto, todas elas se baseiam no princípio físico acima exposto. Uma fonte sonora preenche o ambiente com energia acústica, depois é desligada e um transdutor acústico capta o decaimento energético no decorrer do tempo.

2.4 Microfones microeletromecânicos

Microfones são transdutores que convertem pressão sonora em tensão elétrica. Esses transdutores podem ser de diferentes tipos: eletrostáticos (como é o caso dos microfones condensadores, de eletreto e piezoelétricos), ou eletromagnéticos (microfones dinâmicos e de fita). Como componentes de medição acústica, são eles os responsáveis por transformar a grandeza física da pressão sonora em sinais elétricos passíveis de medida e, por consequência, processamento de dados. Esse é o fundamento dos medidores de pressão sonora.

O microfone *MEMS* é responsável por transformar ondas acústicas em sinais elétricos que, por sua vez, serão convertidos em sinais digitais. No entanto, essas transformações não ocorrem de forma perfeita e dependem de vários fatores. Microfones possuem uma direcionalidade que muda de acordo com a geometria do dispositivo ao qual ele está acoplado, além de terem uma limitação em termos de faixa dinâmica, resposta em frequência e distorções harmônicas [7].

Os microfones *MEMS* possuem características interessantes. Eles tendem a ser resistentes a ruídos de origem eletromagnéticas, possuem boa relação sinal-ruído e são de relativo baixo custo [8], grande atrativo para o desenvolvimento de instrumentação para medições acústicas.

2.5 Microcontrolador Teensy 4.0

Microcontroladores são pequenos computadores que podem ser programados para diversas funções. O Teensy 4.0 é um tipo de microcontrolador com uma extensa biblioteca de áudio. Com ele é possível, entre diversas outras coisas, fazer a comunicação do microfone *MEMS* com um computador. A depender do tipo de microfone *MEMS*, a comunicação é feita de diferentes maneiras, por meio de diferentes protocolos. Para os componentes do protótipo desenvolvido neste trabalho, o

protocolo utilizado é o I²S. Neste caso, a comunicação entre o microfone e o microcontrolador ocorre por três vias: uma via com função de demarcação temporal (*clock*), uma via para seleção do canal (*word select*) e uma via para transmissão de dados (*data SD*) [9].

A biblioteca de áudio do Teensy 4.0 facilita a programação do microcontrolador com o *Audio System Design Tool*, uma ferramenta onde o usuário configura o fluxo dos dados de áudio em uma interface intuitiva. O programa, então, retorna uma rotina Arduino para ser implementada no sistema. Esse programa, assim como outras informações sobre o Teensy, podem ser encontrados no site PJRC [10].

3. METODOLOGIA

Nesta seção são abordadas as características construtivas do protótipo e os métodos que foram utilizados para testar o desempenho do mesmo.

3.1 Características construtivas do protótipo

O sistema de aquisição de sinais acústicos desenvolvido neste trabalho é composto, basicamente, de três partes: um microfone digital *MEMS*, um microcontrolador Teensy 4.0 e um computador. Além disso, um estojo plástico comporta toda a eletrônica para facilitar o uso.

3.1.1 Sistema eletrônico

O Teensy 4.0 é montado em uma *mini-protoboard* e, por meio de *jumpers*, conectado ao microfone *MEMS*. A comunicação desse conjunto com o computador se dá por meio de um cabo USB, alimentando os dispositivos e fazendo a ponte da transferência de dados.

No computador é onde os códigos em linguagem *Python* para medição de pressão sonora e de tempo de reverberação são executados. Essa programação toma como base o *PyTTa toolbox* [3]. Lazarin [11] validou a funcionalidade de medições de tempo de reverberação comparando com o *ITA toolbox*, pacote para MatLab desenvolvido na universidade de Aachen [12].

A Figura 3 mostra como são feitas as conexões entre o computador, os terminais do microcontrolador e o microfone. A conexão do computador com o Teensy 4.0 é feita via USB. Já a conexão

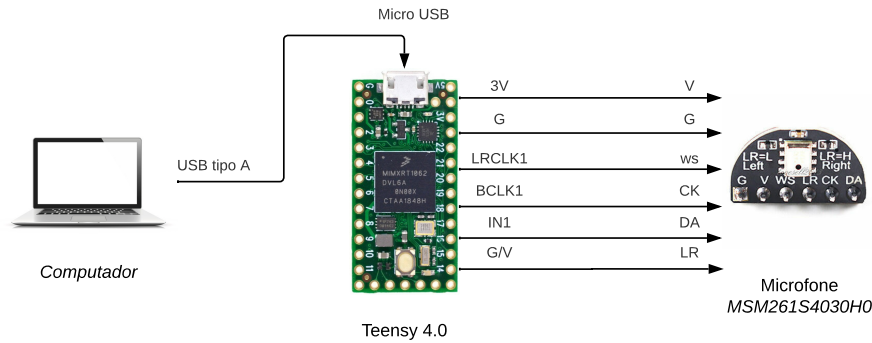


Figura 3: Diagrama das conexões do microfone *MEMS* com o computador.

entre o Teensy 4.0 e o microfone *MEMS* é feita por seis conectores, sendo dois deles responsáveis pela alimentação do circuito integrado do *MEMS* e os outros quatro correspondentes ao protocolo I²S. Os seis pinos do circuito do *MEMS*, e suas respectivas funções, são as seguintes:

- G, do inglês *ground* significando pino terra;
- V, de *voltage*, é o pino de alimentação;
- WS, do inglês *word select*, é responsável por indicar o canal do sinal de áudio sendo transmitido no ciclo de dados;
- LR, é o pino de seleção de canal, i.e., esquerdo ou direito;
- CK, sigla para *clock*, emite os pulsos para demarcar a sincronia do sistema; e
- DA, é o pino de onde saem os dados medidos.

As propriedades do microfone digital Sipeed MSM261S4030H0 são apresentadas na Tabela 1. Em especial, destaca-se a sua característica onidirecional, desejável para a aplicação aqui proposta, a sua sensibilidade (que é útil na determinação do nível de pressão sonora no processamento de sinais) e a sua faixa de frequência útil (ver Figura 4). Para mais detalhes sobre esses quesitos técnicos dos microfones digitais consultar o documento da empresa *Ivensense* [7].

Tabela 1: Especificações técnicas do microfone *MEMS* [13].

Parâmetro	Condição
Direcionalidade	Onidirecional
Sensibilidade	-26 (dB, dBFS @ 1 kHz 1Pa)
Faixa de frequências	100 Hz - 10 kHz
Relação sinal-ruído	57dB (20 kHz bandwidth, A-weighted)
Distorção harmônica total	<1% (100 dB SPL @ 1 kHz S=Nom, Rload>2k)
Acoustic overload point (AOP)	124 dB SPL
NPS máximo	140 dB SPL

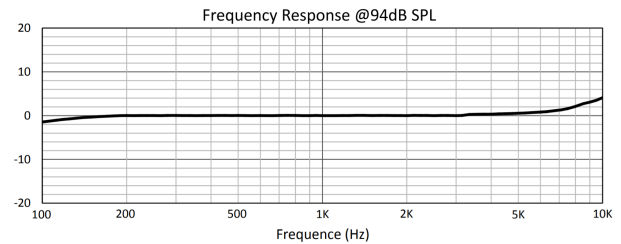
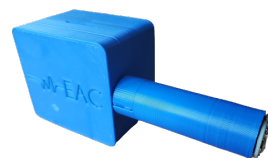


Figura 4: Curva de sensibilidade do *MEMS* [13].

3.1.2 Carcaça e adaptador para calibração relativa

O projeto da carcaça que comporta os componentes foi desenvolvido no *software* de modelagem 3D *AutoCAD* e, na sequência, impresso em impressora 3D. O protótipo montado pode ser visto na Figura 5 (a). Para realizar a calibração dos microfones *MEMS* utilizou-se um adaptador, também impresso em impressora 3D, para fazer o encaixe. A Figura 5 (b) mostra como fica o calibrador B&K Type 4231 ao acoplar o adaptador.



(a) Carcaça para comportar as partes eletrônicas do protótipo.



(b) Adaptador para calibração relativa (em azul).

Figura 5: Peças feitas em impressora 3D.

3.1.3 Custos para construção do dispositivo

Levando em conta todas as peças que compõem o dispositivo, o custo total para construí-lo gira



em torno de R\$ 570,00. A Tabela 2 contém as informações de custo das partes do equipamento. Vale a pena ressaltar que esse custo é baseado no preço dos itens no mercado brasileiro. Caso se opte por importação, esses valores tendem a ser menores.

Tabela 2: Custo das peças para construção do dispositivo.

Peças	Custo (R\$)
Carcaça 3D	70,00
Teensy 4.0	400,00
Microfone <i>MEMS</i>	80,00
Protoboard	8,00
Jumpers	10,00
Total:	568,00

3.2 Ensaio em câmara reverberante

É realizado um ensaio na câmara reverberante do Laboratório de Acústica e Vibrações da Universidade Federal de Santa Maria. A câmara possui um volume de 207 m³ e foi projetada para gerar um campo difuso homogêneo, além de possuir bom isolamento acústico, garantindo um ambiente controlado para realização de toda uma gama de medições. Ao todo, foram testados oito microfones *MEMS* de mesmo modelo, visando à avaliação das diferenças de respostas em frequência nas configurações de fábrica.

3.2.1 Medições de tempo de reverberação

A norma NBR ISO 3382-2 [14] indica metodologias para medição de tempo de reverberação, bem como a instrumentação adequada. No que diz respeito a metodologias, existem duas maneiras: o método do ruído interrompido e o método da resposta impulsiva integrada. O primeiro método é o que o medidor B&K Type 2270 é programado para fazer. Já o sistema com microfone *MEMS*, em associação com o *PyTTa*, é programado para medir pelo método da resposta impulsiva integrada. A comparação dos dois sistemas é, portanto, uma comparação de *hardware* e de processamento de sinais.

Em relação à instrumentação, a norma NBR ISO 3382-2 [14] indica que “Convém que a fonte sonora seja a mais onidirecional possível. [...] A fonte deve produzir um nível de pressão sonora suficiente para fornecer curvas de decaimento com

a faixa dinâmica mínima requerida sem contaminação por som residual”. Para atender a esse padrão é utilizada a fonte sonora OmniPower Sound Source Type 4292-L, do fabricante B&K.

Quanto ao dispositivo de gravação do sinal, a NBR ISO 3382 determina o uso de um medidor de nível sonoro tipo 1, de acordo com a IEC 61672-1 [6]. Por essa razão foi utilizado o sonômetro B&K Type 2270 como controle para a comparação com o protótipo baseado em microfone *MEMS*. O diagrama da Figura 6 mostra a cadeia de medição de tempo de reverberação.

3.2.2 Medições de nível de pressão sonora

Para avaliar a exatidão da medição de nível de pressão sonora feita pelo protótipo, são conduzidos testes dentro da câmara reverberante. Os dois sonômetros são posicionados dentro da sala com uma distância de 2,5 cm entre os transdutores, garantindo que ambos estejam sujeitos ao mesmo campo acústico. Com a mesma instrumentação para geração de sinais é gerado um ruído branco com dois minutos de duração, com o intuito de verificar os níveis de pressão sonora em todo o espectro sonoro relevante.

O outro teste realizado é com sinais senoidais, aumentando a frequência com cada nova tomada de medição. As frequências de 31,5 Hz, 63 Hz, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz, 8 kHz, 12 kHz e 16 kHz foram avaliadas, de maneira semelhante ao do trabalho de Risozevic *et al.* [15], que também se trata do estudo de um sonômetro de baixo custo baseado em microfone *MEMS*.

É feita calibração relativa em ambos os equipamentos utilizando o B&K Type 4231 antes e depois dos testes, para garantir que não ocorra nenhuma grande variação na sensibilidade dos microfones.

3.3 Ensaio em sala de aula

As outras medições são realizadas em uma sala de aula. A instrumentação utilizada é a mesma dos ensaios em câmara reverberante. Basicamente, seguiu-se as diretrizes apontadas pela norma NBR ISO 3382-2 [14], com algumas simplificações. Para uma posição de fonte, são medidos dois pontos de receptor, com três médias cada. Também é

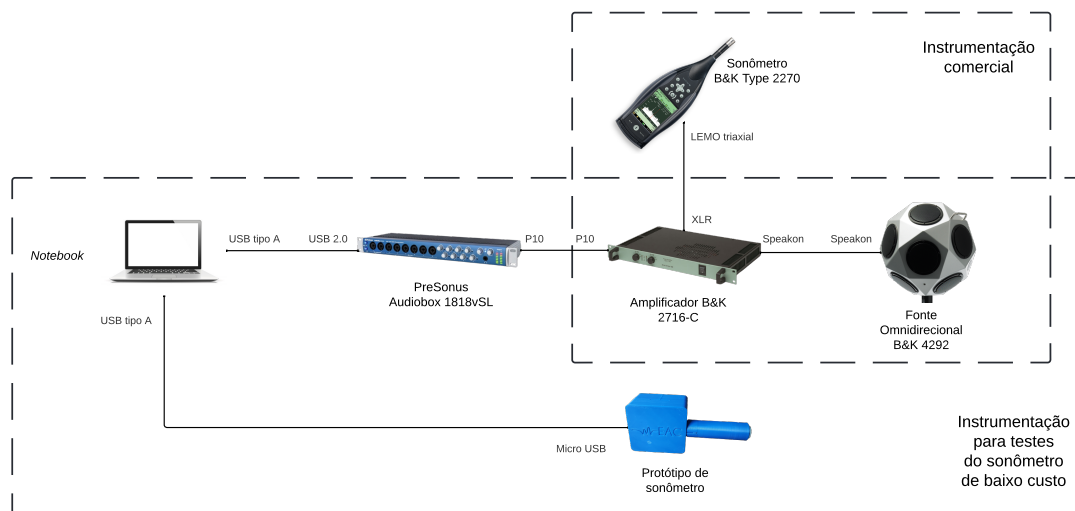


Figura 6: Cadeia de medição de tempo de reverberação.

avaliado o ruído residual no ambiente durante o período dos ensaios. A sala em questão pode ser vista na Figura 7.



Figura 7: Sala de aula onde foram realizados os ensaios.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são apresentados os resultados das medições em câmara reverberante e em sala de aula, assim como os comentários e discussões a respeito.

4.1 Medições de tempo de reverberação

A Figura 8 apresenta os resultados da medição do tempo de reverberação na câmara reverberante obtidos com os oito microfones *MEMS* e com o sonômetro B&K Type 2270.

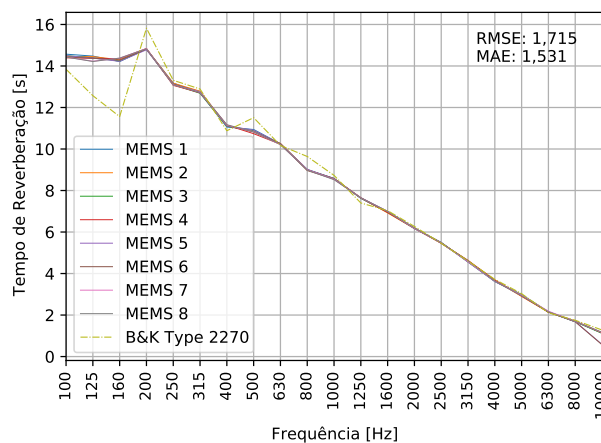


Figura 8: Tempo de reverberação da câmara reverberante medido com oito microfones *MEMS* e com o B&K Type 2270.

Observa-se a semelhança das curvas obtidas com os *MEMS* e a curva obtida com o B&K Type 2270, principalmente nas altas frequências. A raiz quadrática média dos erros (RMSE) entre o valor de referência (curva do B&K Type 2270) e o valor médio entregue pelos microfones *MEMS* foi de 1,715. Já o erro absoluto médio (MAE) entre esses mesmos valores foi de 1,531.

Os valores dos tempos de reverberação medidos na sala de aula são apresentados na Figura 9.

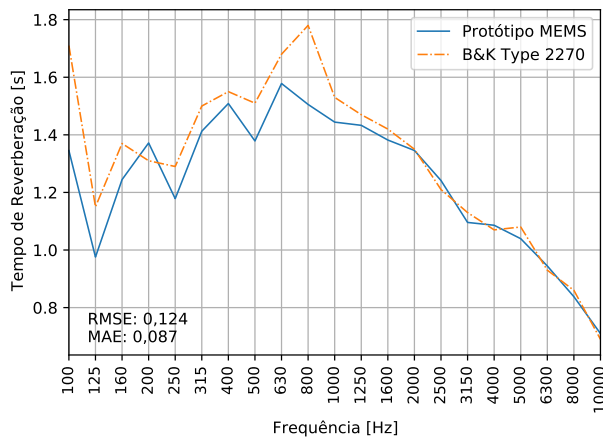


Figura 9: Tempo de reverberação da sala de aula medido com o protótipo e com o B&K Type 2270.

De forma semelhante ao ensaio em câmara reverberante, as curvas do protótipo e do sonômetro comercial tipo 1 são mais próximas nas altas frequências. O RMSE e o MAE para esse ensaio foram menores que no ensaio anterior, 0,124 e 0,087, respectivamente.

As curvas da Figura 8 estão mais próximas do que as curvas da Figura 9. Mas, como os TRs da câmara anecoica são muito maiores, os valores dos erros médios ficam maiores na Figura 8.

4.2 Medições de nível de pressão sonora

Os níveis de pressão sonora obtidos pelas duas instrumentações, em terças de oitava, assim como os níveis equivalentes com ponderações Z e A, são apresentados na Figura 10.

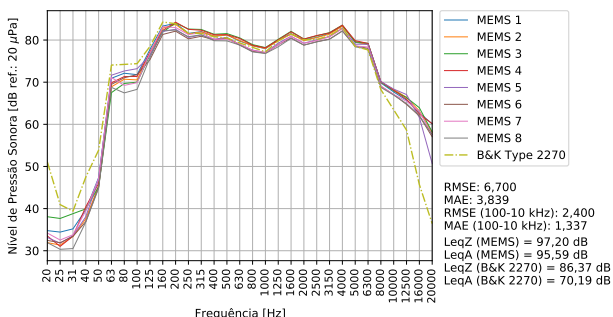


Figura 10: Níveis de pressão sonora medidos com oito microfones *MEMS* e com o B&K Type 2270, para o sinal de ruído branco.

Como esperado, as curvas assemelham-se bastante na região do espectro que vai de 100 Hz até 10 kHz, onde a resposta dos microfones *MEMS* é relativamente plana. Essa semelhança, se consi-

derada a média dos oito microfones comparados com o resultado do sonômetro comercial, é demonstrável pelas métricas do RMSE de 2,400 e do MAE de 1,337.

Os resultados de nível de pressão sonora para o sinal senoidal em 1000 Hz encontra-se logo abaixo, na Figura 11. Os gráficos para os sinais com as outras frequências são apresentados no Apêndice A.

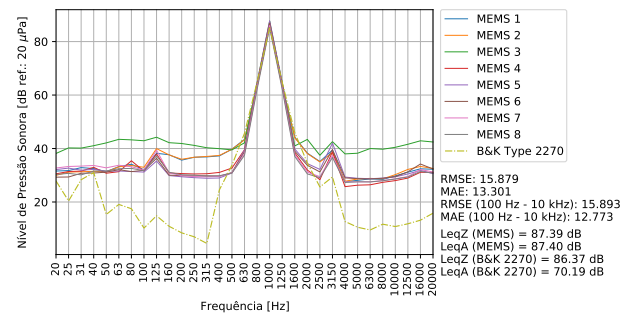


Figura 11: Níveis de pressão sonora medidos com oito microfones *MEMS* e com o B&K Type 2270, para o sinal em 1000 Hz.

Na Figura 11 duas coisas são de maior importância para análise. Em primeiro lugar, os valores apresentados pelos *MEMS* são próximos do sonômetro comercial para a frequência de 1000 Hz. Isso indica que o procedimento de calibração dos *MEMS* funcionou de forma adequada. Além disso, é possível observar que nas outras frequências do espectro o B&K Type 2270 apresentou níveis de pressão sonora menores que os obtidos com os *MEMS*. A explicação para isso é que o ruído residual dentro da câmara é tão baixo que escapa da faixa dinâmica dos microfones digitais.

Outro detalhe a ser observado é que o microfone de número 3 mostrou disparidades em relação aos outros microfones, apresentando níveis maiores para as regiões fora da frequência do sinal senoidal. A faixa dinâmica deste microfone em específico, portanto, é diferente dos demais, entregando resultados menos confiáveis.

Durante os ensaios de tempo de reverberação na sala de aula também foi medido o ruído residual com ambas as instrumentações. A Figura 12 representa as duas curvas obtidas durante essa medição.

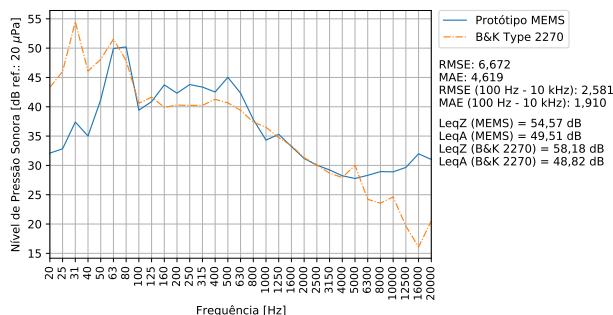


Figura 12: Níveis de ruído residual da sala de aula.

Nas baixas frequências, o B&K Type 2270 tende a apresentar níveis maiores, enquanto que nas altas frequências ocorre o efeito contrário. Para a região de interesse, dos 100 Hz até os 10 kHz observa-se que ambas as curvas apresentam resultados parecidos. O RMSE e o MAE neste caso são de 2,581 e 1,910, respectivamente, um pouco maiores do que para o teste em câmara reverberante usando ruído branco.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresenta uma alternativa de baixo custo para a realização de medições de tempo de reverberação e níveis de pressão sonora utilizando microfone *MEMS* digital. Os ensaios conduzidos em contexto laboratorial e *in situ* serviram para determinar possíveis aplicações do protótipo, comparando seu desempenho com uma instrumentação comercial de tipo 1.

Para as medições de tempo de reverberação, as diferenças mais notáveis se deram na região das baixas frequências, chegando até dois segundos de diferença com relação à métrica de referência. Porém, para as frequências mais altas os resultados foram mais próximos, e portanto mais confiáveis. No que diz respeito às medições de nível de pressão sonora, conclui-se que o procedimento de calibração relativa do protótipo foi bem sucedido, já que foram constatados níveis de pressão sonora semelhantes aos do *B&K Type 2270*. Ressalvas quanto a isso são a faixa dinâmica dos *MEMS* que não permite medições abaixo dos 35 dB, possíveis diferenças de níveis entregues pelos diferentes *MEMS* e a limitação da resposta para a faixa dos 100 Hz até os 10 kHz.

O protótipo tal como se apresenta no momento ainda não deve ser utilizado para confecção de laudos acústicos até seu aperfeiçoamento. No

entanto, ele pode servir para medições provisórias, que não necessitem de tanta precisão, para fins didáticos, obtendo estimativas das métricas de acústicas de sala aqui analisadas.

Para análises entre as frequências de 100 Hz a 10 kHz, que coincidem com a região da fala humana (que vai de 100 Hz até 7 kHz [16]), é possível fazer medições com resultados razoáveis.

O dispositivo foi desenvolvido com o propósito de ser completamente *open-source*, possibilitando modificações e melhorias por qualquer um que se interesse. Os modelos 3D, os códigos utilizados e algumas instruções de como utilizar o equipamento estão disponíveis no repositório GitHub: https://github.com/StefanoMastella/DIY_MEMS_SPL_Meter.

6. AGRADECIMENTOS

Agradecemos aos idealizadores do *PyTTa*, pelos esforços em ampliar as ferramentas de *software open-source* para a comunidade de acústicos do Brasil e do mundo. Sem isso, este trabalho não seria possível. Agradecemos também a Felipe Ramos de Mello e seu orientador, Prof. William D’Andrea Fonseca, que além de produzirem um trabalho pioneiro no ramo das instrumentações em acústica, compartilharam conosco o modelo de adaptador para calibração relativa de microfones *MEMS*, facilitando a realização da presente pesquisa.

REFERÊNCIAS

- [1] Jacomussi, Leonardo; Fonseca, William e Mareze, Paulo. Raspberry pi: A low-cost embedded system for sound pressure level measurement. *Internoise 2020 — 49th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering*, Agosto 2020.
- [2] Mello, Felipe; Fonseca, William e Mareze, Paulo. MEMS digital microphone and arduino compatible microcontroller: an embedded system for noise monitoring. *INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings*, 263, Agosto 2021. doi: [10.3397/IN-2021-2557](https://doi.org/10.3397/IN-2021-2557).
- [3] Fonseca, William; Paes, João Vitor Gutkoski; Lazarin, Matheus; Reis, Marcos; Mareze, Paulo e Brandão, Eric. Pytta: Open source toolbox for acoustic measurement and signal processing. *23rd International Congress on Acoustics - ICA 2019*, Setembro 2019. doi: [10.18154/RWTH-CONV-239980](https://doi.org/10.18154/RWTH-CONV-239980).
- [4] Brandão, Eric. *Acústica de Salas: Projeto e Modelagem*. 1ª ed. São Paulo: Blucher, 2016. ISBN



978-8521210061.

- [5] Bistafa, Sylvio R. *Acústica Aplicada ao Controle do Ruído*. 2ª ed. São Paulo: Blucher, 2011. ISBN 978-8521205814.
- [6] IEC 61672. Electroacoustics - sound level meters. part 1: Specifications. Norma técnica, 2013.
- [7] Ivensense - Application note an-1112: Microphone specifications explained. Disponível em: <https://invensense.tdk.com/download-pdf/an-1112-microphone-specifications-explained/>. Acesso em: 28 de maio 2022.
- [8] Beranek, Leo L. *Acoustics: Sound Fields and Transducers*. 1ª ed. Oxford: Academic Press, 2012. ISBN 978-0123914217.
- [9] Philips, Semiconductors. I²S bus specification. Disponível em: <https://www.sparkfun.com/datasheets/BreakoutBoards/I2SBUS.pdf>. Acesso em: 28 de maio 2022.
- [10] Stoffregen, Paul J. Teensy® USB development board. <https://www.pjrc.com/teensy/>. Acesso em: 11 de maio 2022.
- [11] Lazarin, Matheus. *Medição e cálculo de tempo de reverberação e fator de força com a biblioteca Python in Technical Acoustics (PyTTa)*. Monografia, Julho 2020.
- [12] 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. *DAGA 2012 - 38th German Annual Conference on Acoustics*, Janeiro 2012.
- [13] MEMSensing, Microsystems. MSM261S4030H0 - I²S digital output mems microphone with multi-modes (datasheet) v 1.4, Agosto 2016.
- [14] NBR ISO 3382 - Acústica - Medição de parâmetros de acústica de salas. Parte 2: Tempo de reverberação em salas comuns. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, 2017.
- [15] Bulić, Patricio; Risojević, Vladimir; Pilipovic, Ratko; Češnovar, Rok e Rozman, Robert. Accurate indoor sound level measurement on a low-power and low-cost wireless sensor node. *Sensors*, 18:1–22, 07 2018. doi: 10.3390/s18072351.
- [16] Fels, Janina. *From children to adults: How binaural cues and ear canal impedances grow*. Ph.d. thesis, Institut für Hörtechnik und Akustik, Aachen University, Aachen, Alemanha, 2008.

A. NÍVEIS DE PRESSÃO SONORA PARA OUTROS SINAIS SENOIDAIS

Aqui são apresentados os outros gráficos dos níveis de pressão sonora para os sinais senoidais de 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 2000 Hz, 4000 Hz e 8000 Hz.

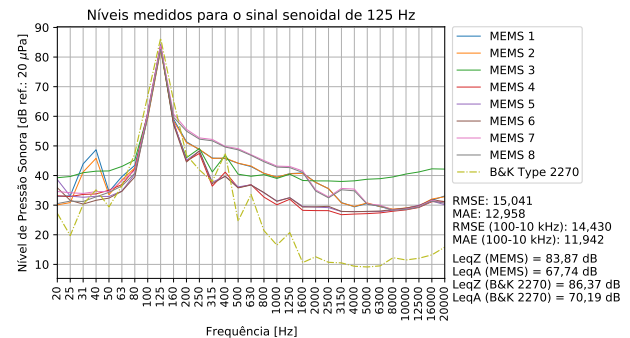


Figura 13: Níveis de pressão sonora medidos com oito microfones MEMS e com o B&K Type 2270, para o sinal de 125 Hz.

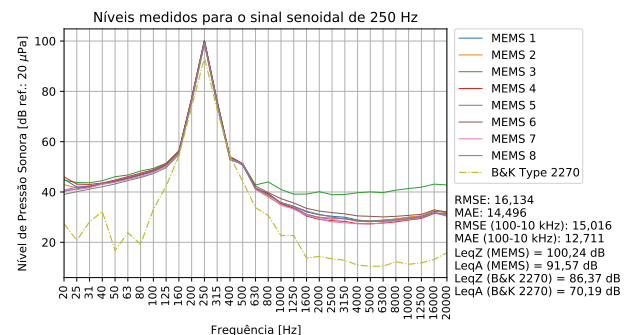


Figura 14: Níveis de pressão sonora medidos com oito microfones MEMS e com o B&K Type 2270, para o sinal de 250 Hz.

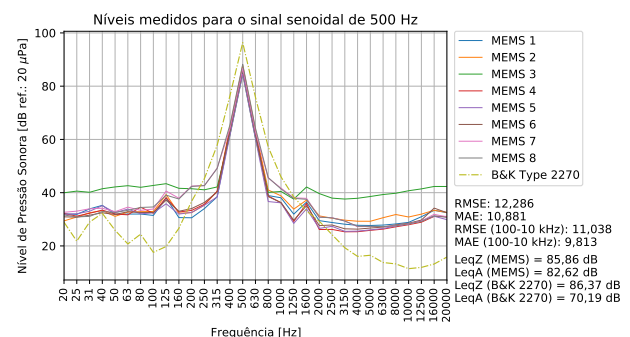


Figura 15: Níveis de pressão sonora medidos com oito microfones MEMS e com o B&K Type 2270, para o sinal de 500 Hz.

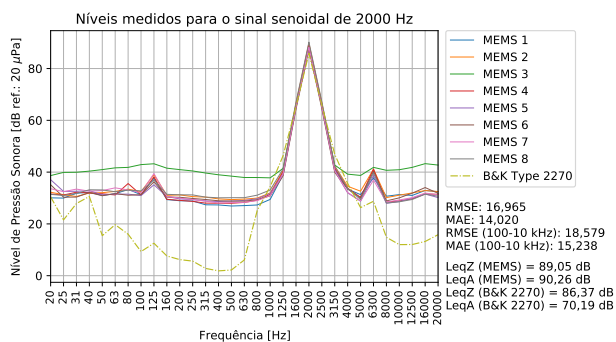


Figura 16: Níveis de pressão sonora medidos com oito microfones *MEMS* e com o B&K Type 2270, para o sinal de 2000 Hz.

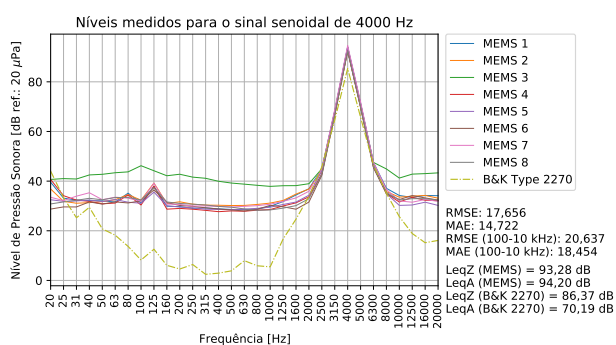


Figura 17: Níveis de pressão sonora medidos com oito microfones *MEMS* e com o B&K Type 2270, para o sinal de 4000 Hz.

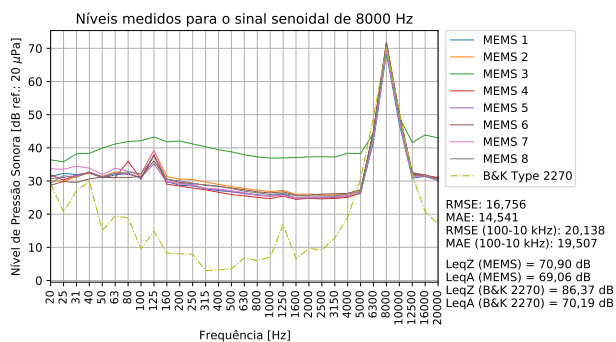


Figura 18: Níveis de pressão sonora medidos com oito microfones *MEMS* e com o B&K Type 2270, para o sinal de 8000 Hz.