

FIA 2020/22

XII CONGRESSO/CONGRESO IBEROAMERICANO DE ACÚSTICA

XXIX ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA - SOBRAC

Florianópolis, SC, Brasil

Caracterização de dispositivos móveis como instrumentos de medição acústica utilizando método da comparação sequencial e varredura de amplitude em câmara semi-anecoica

Brum, R.; Silva, L. C.; Silveira, H. A.; Martins, G.; Lopes, C.; Pinheiro, C.

¹ Engenharia Acústica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil, will.fonseca@eac.ufsm.br

² Laboratório de Vibrações, Instituição, Cidade, Estado, País, nome@dominio.br

Resumo

Com a contínua evolução da capacidade de processamento, os dispositivos móveis estão agregando funções que vão além da sua proposta inicial, a comunicação. Uma funcionalidade é a utilização desses dispositivos como instrumentos de medição, visto que eles embarcam vários sensores. No contexto da acústica, alguns trabalhos sobre sua acurácia de medição já foram desenvolvidos. Nesta pesquisa, curvas de sensibilidade foram obtidas utilizando o método de comparação sequencial em campo livre. O campo acústico foi excitado com varredura exponencial em frequência e aferido com microfone de referência de campo livre 1/2'. A sensibilidade foi obtida pelo método da resposta impulsiva (Soares, 2006), com cinco diferentes níveis energéticos espaçados em 10 dB para realizar a excitação do campo acústico. Os resultados mostraram que a sensibilidade é reduzida com o aumento da pressão sonora incidente no dispositivo, o que sugere a presença de um controle de ganho automático (CGA) nos dispositivos. Constatou-se uma variação de aproximadamente 15 dB na sensibilidade com uma diferença de 40 dB na pressão sonora incidente. Para investigar melhor esse fenômeno, foi utilizado o método de varredura em amplitude proposto por Müller (2007): sinais tonais com envoltória em amplitude ascendente foram utilizados para excitar o campo acústico com portadoras nas frequências centrais das bandas de oitava entre 60 Hz e 4 kHz. Os resultados desse experimento mostraram uma relação não proporcional entre amplitude do sinal de excitação e resposta do sistema, o que corrobora com a presença do CGA. A partir dos resultados, conclui-se que é necessário desabilitar ou compensar a função de CGA do dispositivo para obter medições de alta acurácia. Outra opção seria processar o sinal para compensar a função CGA, o que pode ser computacionalmente custoso e impreciso.

Palavras-chave: Medições acústicas, Dispositivos móveis, Calibração.

PACS: 43.38.Kb, 43.38.Md, 43.58.Vb.

Characterization of mobile devices as instruments of acoustic measurement using sequential comparison method and amplitude sweep in semi-anechoic chamber

Abstract

With the continuous increasing of the processing power, the mobile devices are adding more functions every time, being the applications going beyond the communication, the principal objective of a cellphone. One of these functions is the use of the mobile devices as measurement instruments, since there are a lot of sensors embedded in smartphones and tablets. In acoustics' context, some works were developed about measurement accuracy. In this work, sensitivity curves were obtained using the sequential comparison method in free field. The acoustic field was excited with an exponential sweep signal and gauged a reference microphone of 1/2'. The sensitivity obtained using the impulsive response method (Soares, 2007) with five different levels spaced in 10 dB to excite the acoustic field. The results showed a reduction of the sensitivity when the incident sound pressure in the microphone increase. It was observed a variation of 15 dB in the sensitivity in a range of 40 dB in the excitation of the acoustic field. To investigate better this effect, the sweep level method purposed by Müller (2007) was used: tonal signals with ascending amplitude envelope and carrier frequencies tuned in the central octave bands between 60 Hz and 4 kHz. The results of this experiment allows to conclude that it is need to compensate or disable the CGA function for high performance measurements. Another option can be processing the recorded signal with an inverse filter to compensate CGA, however it generate large computer processing and inaccurate results.

Keywords: Acoustic measurements, mobile devices, calibration.



1. INTRODUÇÃO

Dispositivos móveis estão cada vez mais presentes nas atividades cotidianas das pessoas. Em parte, isso ocorre porque esses equipamentos compõem o cerne da comunicação atual, que sofreu uma revolução nas últimas décadas. Informações atravessam o mundo em milissegundos, o que permite uma conectividade global através da internet.

Além da comunicação, os *smartphones* vêm oferecendo uma gama enorme de funcionalidades. Abrangendo desde aplicações entretenimento até lojas virtuais, serviços de entrega e até operações bancárias que podem ser realizadas de forma prática e totalmente remota. Isso é possível principalmente graças a dois grandes avanços: de um lado a microeletrônica, que permite cada vez mais a miniaturização dos dispositivos e aumento da capacidade de processamento, e, de outro lado, a conectividade móvel cada vez mais avançada, como é o caso das redes 4G e 5G que já estão disponíveis em praticamente todas as partes do mundo.

Uma aplicação que vem ganhando espaço é a utilização de dispositivos móveis como ferramentas para medições, o que é uma tendência natural ao se considerar a quantidade de sensores embarcados nesses aparelhos: GPS, acelerômetros, giroscópios e microfones.

Do ponto de vista de medições acústicas, muitas aplicações e estudos foram desenvolvidos nos últimos anos. Porém, sabe-se que uma das grandes limitações em termos de metrológicos para medições acústicas é a qualificação do equipamento utilizado.

Um sonômetro profissional deve qualificado dentro das normas ANSI 1.4 [1] e IEC 61672-1 [2], podendo ser classificado como tipo 1, para medições de precisão e tipo 2, para aplicações gerais. No caso de um dispositivo móvel, todos seus elementos de software e hardware devem ser qualificados. Uma mera atualização de sistema operacional exige uma requalificação do sistema.

No entanto, a qualificação geralmente só limita a utilização para medições de alta acurácia e que demandem rastreabilidade metrológica. Exemplos são aplicações em questões legais como processos de licença ambiental, perturbação do sossego, dentre outros. Logo, a utilização de sonômetros

alternativos de baixo custo é muito atrativa no contexto de ensino, pesquisa e mesmo em aplicações de engenharia para aferições gerais de resultados.

Nessa conjuntura, Kardous e Shaw [3] realizaram um estudo sobre a performance de dispositivos móveis para caracterização de ruído ocupacional. Os autores realizaram uma ampliação desse estudo utilizando microfones externos e comparando os resultados com os obtidos nos transdutores embarcados nos dispositivos, concluindo que as incertezas são reduzidas utilizando microfones externos [4].

Porém, um estudo que carece de investigação se refere à avaliação da resposta em frequência e obtenção de curvas de sensibilidade dos dispositivos móveis. Assim, o presente trabalho propõe uma caracterização de dispositivos móveis em câmara semi-anecoica utilizando o método de comparação sequencial em campo livre. Essa técnica permite avaliar o comportamento do dispositivo comparando-o com um microfone de referência, metodologia amplamente discutida trabalhos da literatura [5–7].

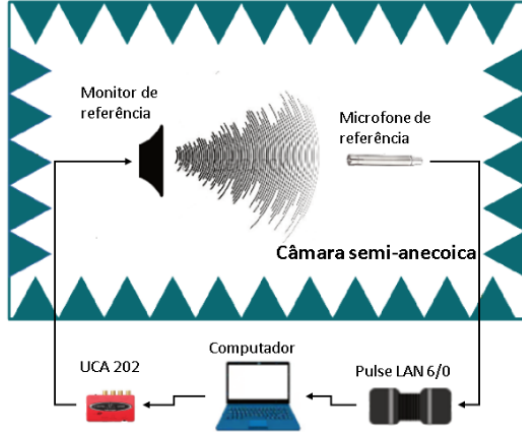
2. CURVAS DE SENSIBILIDADE DOS DISPOSITIVOS

A primeira etapa de avaliação dos dispositivos foi implementada com base no método de comparação sequencial para calibração de microfones [5–7]. Esse procedimento, conforme ilustrado na Figura 1, consiste basicamente em gerar o campo acústico em campo livre utilizando fonte eletroacústica e então medir o sinal acústico com um microfone de referência (MR) e em seguida, dispositivo sob teste (DUT).

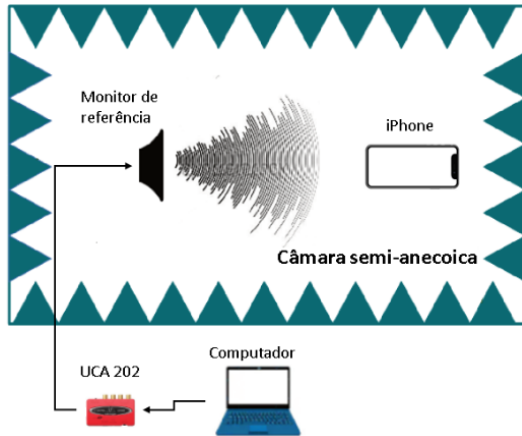
Os equipamentos utilizados para o teste foram:

- MR: microfone de campo livre modelo 4189, fabricante Bruel & Kjaer;
- Hardware de aquisição Pulse LAN 6/0;
- Interface de áudio USB Behringer UCA 222;
- Monitor de Áudio Genelec 8020D;
- iPhone XR;
- iPhone 7 Plus.

Optou-se por utilizar um iPhone devido à melhor padronização de hardware proporcionada por esses dispositivos, uma vez que a plataforma Android é utilizada por diversos fabricantes de *smartphones* e *tablets*.



(a) Microfone de referência



(b) Dispositivo móvel

Figura 1: Medições da resposta em frequência de um microfone de referência (a) *smartphone* (b) realizadas em câmara semi-anecóica.

No método de comparação sequencial, a sensibilidade do DUT é obtida por:

$$S_{\text{DUT}}(f) = \frac{X_{\text{DUT}}(f)}{P_{\text{ref}}(f)} [1/\text{Pa}], \quad (1)$$

sendo $P_{\text{ref}}(f)$ a pressão sonora obtida com o MR e X_{DUT} o sinal gravado com o DUT. É importante observar que a sensibilidade de microfones é dada em volts por pascal [V/Pa]. Porém, no caso dos dispositivos móveis, não há informação dos níveis de tensão dentro do aparelho. Logo, utiliza-se a escala relativa e o nível do sinal gravado é

assumido como adimensional.

Para eliminar possíveis influências do ambiente de medição e otimizar a relação sinal ruído, foi aplicado o método de campo livre simulado, no qual se compara a resposta em frequência de campo livre entre fonte sonora e microfones teste e referência [5, 8]. Essa técnica consiste em relacionar o campo acústico obtido entre MR e DUT a partir de suas respectivas funções resposta em frequência (FRF) entre o sinal medido e a excitação. Dessa forma, pode-se reescrever a Equação 1 como:

$$S_{\text{DUT}}(f) = \frac{X_{\text{DUT}}(f)/X(f)}{P_{\text{ref}}(f)/X(f)} [1/\text{Pa}], \quad (2)$$

em que $X(f)$ a representação no domínio da frequência do sinal de excitação gerado. A SNR é otimizada a partir do janelamento das respostas impulsivas (RIs) obtidas e posterior transformação ao domínio da frequência via Transformada de Fourier.

Para o cálculo da resposta em frequência do sistema, o campo acústico foi excitado com um sinal de varredura exponencial com duração de aproximadamente 6 segundos. O sinal de excitação foi gerado em 5 níveis diferentes, espaçado em 10 dB na escala digital (dBFS). Assim, foram geradas varreduras com -40, -30, -20, -10 e 0 dBFS para excitar o campo acústico com diferentes níveis de energia.

Tanto o microfone teste quanto o referência foram reposicionados para reduzir as incertezas de posicionamento do receptor em relação à fonte sonora. A diferença entre o nível de pressão sonora (NPS) máximo e mínimo obtido em todos os reposicionamentos com o microfone teste pode é mostrada na Figura 2.

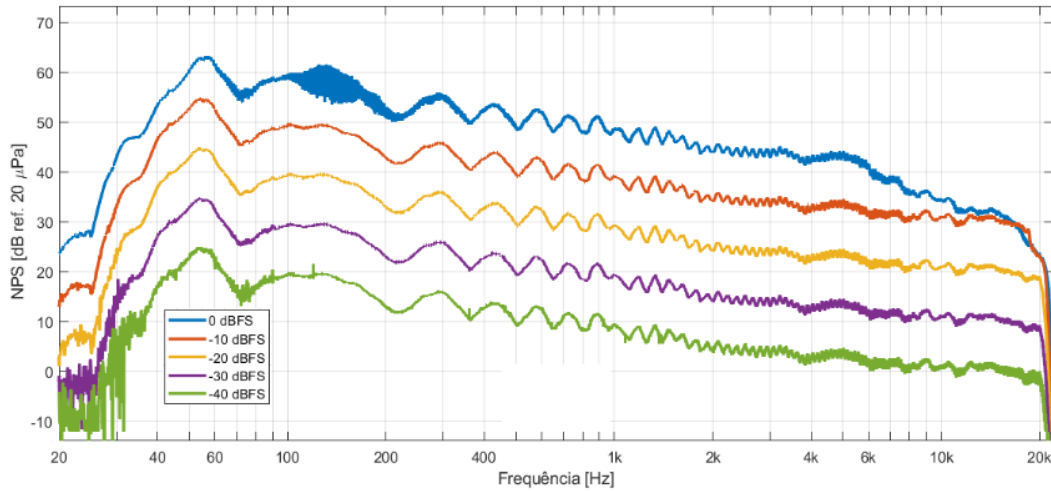


Figura 3: NPS para os diferentes níveis de excitação do campo acústico utilizando *sweep* exponencial.

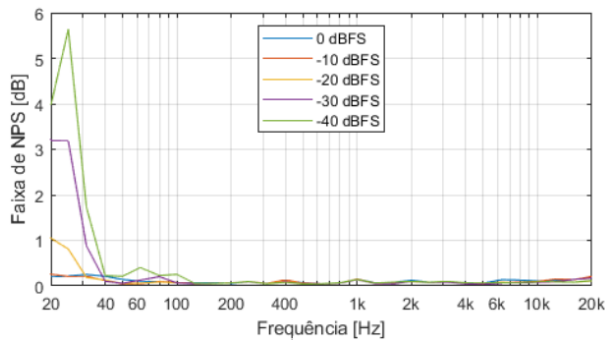


Figura 2: Diferença do NPS máximo e mínimo ($L_{\max} - L_{\min}$) em bandas de terço de oitava obtidos em todos os reposicionamentos do MR.

A partir da análise da Figura 2, observa-se que a variabilidade do campo acústico é extremamente baixa, não ultrapassando 0,5 dB a partir de 40 Hz. Abaixo dessa frequência ocorre maior dispersão em função da baixa energia radiada pela fonte sonora. Ou seja, há predominância do ruído de fundo cuja característica estocástica eleva a dispersão dos dados sob análise.

A Figura 3 mostra os espectros de NPS obtidos com o microfone de referência para os diferentes níveis do sinal de excitação. Observa-se que as diferenças de amplitude na excitação geram a praticamente a mesma diferença no espectro medido, visto que as curvas são espaçadas em 10 dB.

Abaixo de 40 Hz não se observa a mesma concordância, principalmente nas curvas de mais baixa amplitude. Isso também é efeito do ruído de fundo, visto que a fonte não excita o campo acústico nessa faixa de frequências. Outra discrepância ocorre na faixa de frequência compreendida

entre 100 e 200 Hz para a curva azul (0 dBFS). Isso ocorre devido a não-linearidades da fonte sonora nessa faixa de frequências para a amplitude do sinal de entrada. No processo de calibração essa curva deve ser removida ou as não-linearidades removidas pelo janelamento da RI do sistema [9].

A Figura 4 mostra a sensibilidade obtida dos 2 *smartphones* para os 5 níveis de excitação do campo acústico. Observam-se curvas consideravelmente planas entre 60 e 10 kHz. Abaixo de 60 Hz as curvas tem o comportamento típico de um filtro passa-altas, o que possivelmente é implementado no dispositivo para remoção da componente de tensão contínua, necessária para alimentar o microfone.

Acima de 10 kHz observa-se o mesmo fenômeno, nesse caso um filtro passa-baixas, que é o filtro anti-rebatimento que antecede o conversor analógico-digital do dispositivo. Os altos valores em 20 kHz ocorrem possivelmente em função da baixa energia tanto no DUT quanto no MR. Logo, a faixa de frequências de operação do DUT deve ser definida entre 60 e 10 kHz, preferencialmente.

O aumento brusco de sensibilidade próximo aos 20 kHz deve-se a baixa energia no sinal tanto no DUT quanto no MR. Dessa forma, a análise em frequências muito altas é inviável utilizando o dispositivo. Uma forma de tratar esse problema é utilizar regularização das FRFs obtidas [10].

A diferença de sensibilidade em função dos diferentes níveis de excitação evidencia que os dispo-

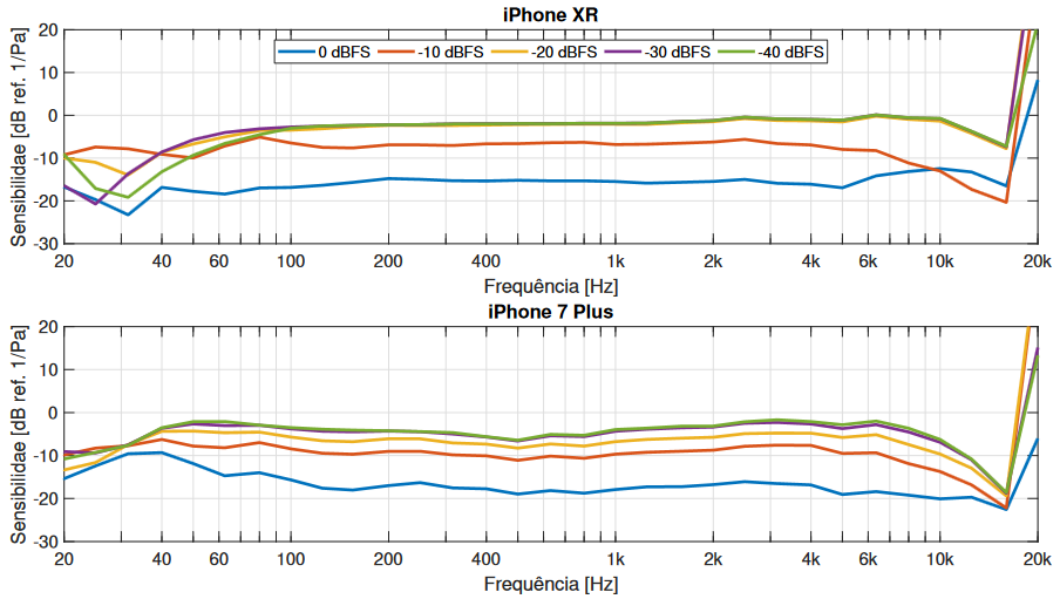


Figura 4: Curvas de sensibilidade obtidas para os dois dispositivos medidos em bandas de terço de oitava com os 5 níveis de excitação do campo acústico.

sitivos possuem Controle Automático de Ganho (CAG) [11]¹ em toda a faixa de operação. Logo, uma simples correção de um sinal medido pela sensibilidade é insuficiente para estimar os parâmetros acústicos do sinal sob análise. Para corrigir isso, deve-se encontrar uma forma de desabilitar a compressão dinâmica ou realizar a correção nos dados medidos.

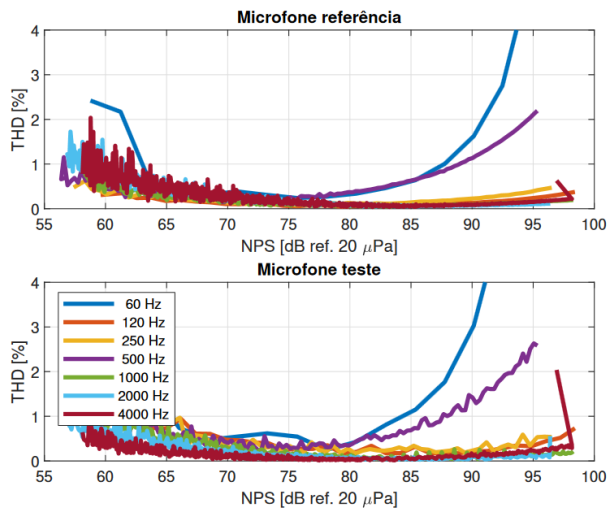


Figura 5: THD em função do NPS obtida utilizando o iPhone XR.

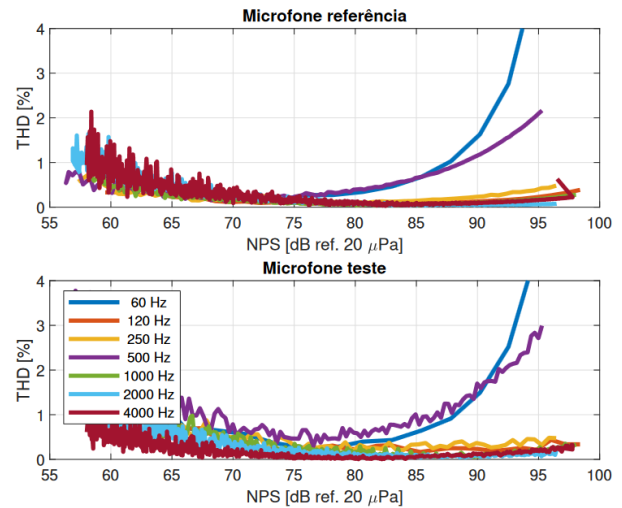


Figura 6: THD em função do NPS obtida utilizando o iPhone 7 Plus.

3. ANÁLISE DA DISTORÇÃO HARMÔNICA TOTAL (THD) OBTIDA COM OS DISPOSITIVOS

Para investigar melhor o comportamento não linear proporcionado pelo CAG, as cadeias de medição ilustradas na Figura 1 foram utilizadas para realizar a medição de distorção harmônica total (THD) utilizando o método de varredura em amplitude com sinais tonais ou *sweep level* [13].

As Figuras 5 e 6 mostram as THDs obtidas em cada frequência com os iPhones XR e 7 Plus, respectivamente. A partir dos resultados, observa-se que a THD extrapola 3% apenas na frequência de

¹Esse tipo de processamento é também denominado de compressão dinâmica na literatura de processamentos de sinais aplicada ao áudio [12].



60 Hz tanto para DUT quanto para MR. Para essa frequência, a THD do iPhone XR é levemente maior, o que sugere que o dispositivo possa ter contribuição para a THD nesse caso.

Ademais, o perfil das curvas é bastante semelhante entre os iPhones e também entre DUT e MR. Dessa forma, pode-se inferir que a principal fonte de THD é a fonte sonora, o que é esperado nesse tipo de teste. Logo, para avaliar o limite de operação dos microfones, é necessário um aparato mais sofisticado que não gere distorção harmônica no campo acústico. Uma alternativa para esse teste é realizar as medições em campo de pressão, conforme explicado por Müller e Soares [6].

Um fenômeno interessante é a oscilação na THD para baixos NPS. Esse fenômeno ocorre por causa da SNR menor nessa região, o que aumenta a incerteza da medição de THD.

4. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

O presente trabalho teve como objetivo avaliar o potencial de dispositivos móveis para medições acústicas. Dois dispositivos foram avaliados pelo método de comparação sequencial em campo livre e pelo método de *sweep level*. Para ambas técnicas foi utilizando um microfone de referência de campo livre. Os resultados mostraram que a presença de CAG compromete de forma significativa a utilização dos gravadores nativos para realizar medições acústicas.

Assim, para contornar esse problema, duas abordagens são possíveis: a primeira seria buscar uma técnica de filtragem inversa na etapa de processamento que compense o CAG do dispositivo. A segunda seria desenvolver um gravador proprietário, que desabilite nativamente a função de CAG. Como trabalho futuro, pretende-se implementar as duas abordagens e avaliar o potencial do CAG para aumentar a faixa dinâmica do dispositivo.

REFERÊNCIAS

- [1] ANSI S1.4-1983 (R2006)/ANSI S1.4a-1985 (R2006) - American National Standard Specification for Sound Level Meters, . Disponível em: <https://webstore.ansi.org/Standards/ASA/ansis11983r20064a1985>.
- [2] IEC 61672-1:2013 - Electroacoustics - Sound level meters - Part 1: Specifications, . Disponível em: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iec/10e2b666-5ae8-49a3-ba15-d327c765c18a/iec-61672-1-2013>.
- [3] Kardous, Chucrí A e Shaw, Peter B. Evaluation of smartphone sound measurement applications. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 135(4): EL186–EL192, 2014.
- [4] Kardous, Chucrí A e Shaw, Peter B. Evaluation of smartphone sound measurement applications (apps) using external microphones—a follow-up study. *The Journal of the acoustical society of America*, 140(4): EL327–EL333, 2016.
- [5] Soares, Zemar Martins Defilippo *et al.* *Calibração de microfones com resposta impulsiva*. 2006.
- [6] Müller, Swen e Soares, Zemar. *Caracterização de microfones de medição*. 11a Convenção Nacional da AES Brasil, São Paulo, 2013.
- [7] Silva, Lúcia. *Caracterização de microfones mems analógicos. trabalho de conclusão de curso*. 07 2018. doi: [10.13140/RG.2.2.25995.64808](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.25995.64808).
- [8] Brum, Ricardo. *Estudo da influência de diferentes técnicas de auralização na avaliação da qualidade sonora de produtos*, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/220398>.
- [9] Müller, Swen e Massarani, Paulo. Transfer-function measurement with sweeps. *Journal of the Audio Engineering Society*, 49(6):443–471, 2001. ISSN 1549-4950. Disponível em: <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=10189>.
- [10] Kirkeby, Ole e Nelson, Philip A. Digital filter design for inversion problems in sound reproduction. *Journal of the Audio Engineering Society*, 47(7/8):583–595, 1999.
- [11] Faber, Benjamin M. *Acoustical measurements with smartphones: Possibilities and limitations*. *Acoust. Today*, 13(2):10–17, 2017.
- [12] Zölzer, Udo. *Dafx*. 2ª ed. Hoboken, NJ: Wiley-Blackwell, Março 2011.
- [13] Müller, Swen e Espírito Santo, Nelson Melo. *Fast distortion vs. level measurements with smoothly increasing signal amplitudes*. 11a Convenção Nacional da AES Brasil, São Paulo, 2007.