

# FIA 2020/22

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

Florianópolis, SC, Brasil

## Desenvolvimento e validação inicial de uma solução para ensino remoto de audiometria tonal limiar

Trentin, G.<sup>1</sup>; Bagnara, B. O.<sup>2</sup>; Murta B. H. P.<sup>3</sup>; Lara A. A. S.<sup>4</sup>; Zucki F. M.<sup>5</sup>; Paul S.<sup>6</sup>;

<sup>1,4</sup> Enga. de Controle e Automação, UFSC, SC, Brasil, {gutotrentin, angelo.asl20}@gmail.com

<sup>2,5</sup> Fonoaudióloga, UFSC, SC, Brasil, brunabagnara07@gmail.com, fernanda.zucki@ufsc.br

<sup>3,6</sup> Laboratório de Vibrações e Acústica, UFSC, Florianópolis, SC, Brasil, be.murta@gmail.com, stephan.paul@ufsc.br

### Resumo

Com o COVID-19 as atividades práticas no ensino, normalmente realizadas em ambiente laboratorial ou clínico, como a prática da audiologia clínica, precisaram ser reestruturadas. Para auxiliar o ensino remoto em audiologia, foi desenvolvido para a plataforma perSONA um módulo específico para simular um audiômetro típico e permitir que alunos pratiquem a condução de audiometria tonal limiar (ATL) por via aérea utilizando computadores pessoais. O novo módulo foi desenvolvido em C#, incluindo 1) a calibração psicoacústica, 2) a reprodução de ruídos de mascaramento e tons puros para fins de ATL. A calibração psicoacústica, baseada no limiar auditivo (LA) do usuário, visa garantir resultados adequados nas ATL, uma vez que 1) os transdutores de som (diferentes fones de ouvido usados pelos alunos em casa) tem *headphone* FRFs desconhecidos e nenhum LA, a priori, pode ser considerado e codificado no módulo e 2) os alunos não tem os equipamento para calibração instrumental. Ruídos de mascaramento, para uso na investigação de LA tonais por condução aérea, foram gerados a partir do ruído branco filtrado com filtros de oitava. Para uma reprodução de som adequada no Windows X64, um driver de áudio específico (ASIO4ALL) foi incluído no instalador do software. O módulo foi validado de duas formas: 1) professores e alunos de Audiologia avaliaram sua interface e funcionamento por meio de questionários eletrônicos; 2) Validação instrumental da reprodução sonora, avaliando os níveis de pressão sonora, níveis de audibilidade e frequências de reprodução de tons puros utilizando um manequim KEMAR com fones Sennheiser HD580, HDA 300 e C3Tech e utilizando o módulo de ATL em diferentes computadores com diferentes placas de som. Os resultados mostraram-se muito satisfatórios. Contudo a reprodução correta dos níveis sonoros e níveis auditivos requer o *driver* ASIO4ALL, contornando equalizadores e compressores de volume presentes por padrão nos drivers das placas de áudio do Windows 10.

**Palavras-chave:** audiômetro, simulador, Windows, ensino.

**PACS:** 43.58.Ta; 43.58.Vb; 43.66.Yw; 43.10.Sv.

### Development and Initial Validation of a Solution for Remote Teaching of Pure Tone Audiometry

#### Abstract

Due to COVID-19, practical activities in teaching, normally carried out in a laboratory or clinical environment, such as the practice of clinical audiology, needed to be restructured. To assist distance teaching in audiology, a specific module to simulate a typical audiometer and allow students to practice conducting pure tone air conduction audiometry (PTA) using personal computers was developed for the perSONA platform. The new module was developed in C#, including functionalities such as 1) psychoacoustic calibration, 2) reproduction of masking noise and pure tones for PTA. Psychoacoustic calibration, based on the user's auditory threshold (AT), is required to obtain adequate results in PTA, since 1) the sound transducer's (different headphones used by students at home) HpFRFs are unknown and no AT, a priori, can be considered and coded in the module and 2) users/students do not have the equipment for an instrumental calibration. Masking noise, to be used in the PTA, was generated filtering white noise by octave filters. For proper sound reproduction on Windows X64, a specific audio driver (ASIO4ALL) has been included in the software installer. The module was validated by: 1) audiology teachers and students evaluating its interface and functioning through electronic questionnaires; 2) Instrumental validation of the sound reproduction, assessing SPL, hearing levels (HLs) and pure-tone frequencies using a KEMAR manikin together with Sennheiser HD580, HDA300 and c30 Tech headphones and running the ATL module on different computers with different sound cards. Results proved to be very satisfactory, but correct reproduction of SPLs and HLs is possible only using the ASIO4ALL driver, as this one circumvents all equalizers and volume compressors present by default in Windows 10 audio card drivers.

**Keywords:** pure tone audiometer, simulator, Windows, teaching.



## 1. INTRODUÇÃO

As repercussões ocasionadas pelo SARS-CoV-2 atingiram diversas esferas do cotidiano e considerando os processos de ensino, houve a frenética necessidade de adaptar, sobretudo, as atividades práticas que habitualmente dependem de equipamentos ou ambientes específicos. Nesse contexto, houve o surgimento de uma demanda relacionada ao impasse de ministrar a prática audiológica clínica que corriqueiramente é realizada em ambiente ambulatorial, permitindo que os alunos exercitem a audiometria tonal manuseando audiômetro profissional. Na tentativa de suprir a demanda e auxiliar o ensino a distância em audiologia, foi desenvolvido para a plataforma perSONA um módulo específico para simular um audiômetro típico e permitir aos professores e alunos a prática de audiometria tonal por via área utilizando computadores pessoais. O novo módulo foi desenvolvido em C#, com funcionalidades que incluem 1) calibração psicoacústica, 2) reprodução de ruído de mascaramento e 3) reprodução de tons puros de diferentes frequências.

O *software* perSONA foi inicialmente desenvolvido para a realização de ensaios para avaliar a percepção de fala no ruído, focado em pacientes usuários de dispositivos auditivos como aparelhos de amplificação sonora individual (AASI) e implante coclear (IC) [1]. Por conta disso, o *software* se mostrou uma ferramenta extremamente promissora para possível implementação de um módulo de realização de audiometria tonal limiar, uma vez que já contava com funcionalidades capazes de sintetizar fontes sonoras espacialmente distribuídas, através do VA, que é o *framework* responsável pela sintetização e reprodução sonora.

Este artigo tem a finalidade de descrever os aspectos técnicos sobre o desenvolvimento, a validação e os resultados que dizem respeito ao módulo de Audiometria Tonal Limiar ensino (ATLe) implementado no perSONA decorrente das necessidades causadas pelo SARS-CoV-2.

## 2. CONCEITOS FUNDAMENTAIS EM AUDIOMETRIA TONAL LIMIAR (ATL)

Na Audiometria tonal limiar verifica-se o limiar auditivo de uma pessoa, sendo este definido como o nível mínimo de pressão sonora capaz de provocar a percepção auditiva em 50% das estimulações

em um ambiente silencioso. O limiar auditivo é uma função (Figura 1) da frequência e da forma de apresentação do estímulo sonoro (por fones ou em campo livre). Ainda, varia de indivíduo para indivíduo, dependendo da integridade do sistema auditivo.

No contexto da audiometria tonal limiar o nível sonoro mais utilizado é o nível de audição  $L_{aud}$  (dB[NA]), que nada mais é do que o próprio NPS com uma ponderação. Essa ponderação se baseia no limiar auditivo padrão, ou seja, o início da escala de nível de audição (0 dB[NA]) tem um NPS distinto para cada frequência (Figura 1).

Portanto, o nível de audição  $L_{aud}$ , em função da frequência, pode ser expresso por:

$$L_{aud}(f) = L_p(f) - L_{p, \text{limiar ISO 226:2003}}(f), \quad (1)$$

sendo  $L_{aud}$  o nível de audição,  $L_p$  a pressão sonora eficaz e  $L_{p, \text{limiar ISO 226:2003}}$  o nível de pressão sonora no limiar, em cada frequência, conforme a ISO 226:2003.

No exame de ATL determinam-se os limiares auditivos do paciente, comparando com os padrões de normalidade utilizando tons puros [4]. Esses padrões foram obtidos a partir da mediana dos limiares de um grupo de indivíduos otologicamente normais de idade entre 18 e 25 anos, e são padronizados pela ISO 226:2003. As frequências nas quais os limiares são avaliadas por meio de tons puros são: 125; 250; 500; 750 Hz, 1; 1,5; 2; 3; 4; 6 e 8 kHz.

Normalmente a avaliação dos limiares auditivos do paciente é realizada em clínicas e utiliza um audiômetro (Figura 2). O audiômetro é utilizado para geração de sinais sonoros com níveis confiáveis, tendo uma boa placa de som, sendo assim caracterizada por possibilitar a reprodução em elevados níveis auditivos. Além disso, audiômetros modernos (Figura 2) também salvam as respostas do indivíduo à estimulação e permitem a plotagem dos audiogramas de forma automática.

Tendo em vista as definições anteriores, o limiar auditivo de um indivíduo em uma determinada frequência é definido como o mínimo nível de audição capaz de provocar a percepção auditiva em 50% das apresentações no paciente:

$$\text{Limiar}(f) = \min \{L_{aud}(f)\} |_{50\%}, \quad (2)$$

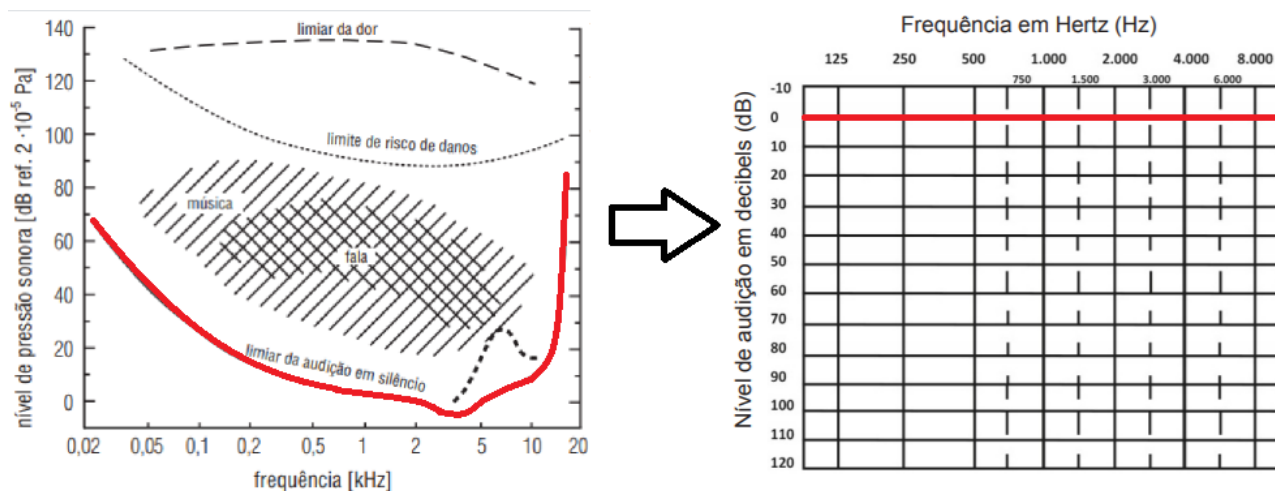


**Figura 1:** Limiar da audição (padrão de normalidade pela ISO 226:2003) representado em função do nível de pressão sonora (dB[NPS]) no gráfico da área da audição, e representado em termos de nível de audição (dB[NA]) no audiograma [2, 3].



**Figura 2:** Audiômetro moderno.

e ainda considerando que o paciente foi capaz de identificar o sinal no nível de audição atual e não foi capaz de identificar o sinal em um nível de audição de 5 dB[NA] abaixo do atual.

Em casos específicos podem ser utilizados os chamados ruídos de mascaramentos. O mascaramento pode ser utilizado quando o paciente apresenta grau de perda auditiva diferente em cada ouvido. Quando um paciente com essas características é avaliado, é possível que durante a obtenção do limiar da orelha com pior audição ocorra a sugestão de que a orelha com melhor audição esteja respondendo ao estímulo gerado. Sendo assim, é necessário impedir que a orelha com melhor audição seja capaz de identificar a resposta, para isso, são utilizados ruídos específicos nessa orelha, enquanto na orelha avaliada (com perda mais severa), o exame segue sendo realizado através da reprodução de tons puros.

Os limiares auditivos devem ser apresentados em um audiograma (gráfico da direita na Figura 1). Dependendo da avaliação realizada diferentes símbolos (Figura 3) devem ser utilizados no audiograma, para identificar o procedimento utilizado e assim possibilitar o diagnóstico correto.

|                      | PROCEDIMENTO DE TESTE               | ORELHA DIREITA | ORELHA ESQUERDA |
|----------------------|-------------------------------------|----------------|-----------------|
| VIA AÉREA (FONES)    | Não mascarada                       | O              | X               |
|                      | Mascarada                           | Δ              | □               |
|                      | Ausência de resposta não mascarada  | o              | x               |
|                      | Ausência de resposta mascarada      | Δ              | □               |
| VIA ÓSSEA (MASTÓIDE) | Resposta não mascarada              | <              | >               |
|                      | Resposta mascarada                  | [              | ]               |
|                      | Ausência de resposta não mascarada  | S              | Z               |
|                      | Ausência de resposta mascarada      | f              | h               |
| VIA ÓSSEA (FRONTE)   | Resposta                            | V              | V               |
|                      | Ausência de resposta                | Y              | Y               |
|                      | Resposta mascarada                  | 7              | 7               |
|                      | Ausência de resposta mascarada      | f              | h               |
| CAMPO LIVRE          | Resposta                            | Ø              | Ø               |
|                      | Ausência de resposta em Campo Livre | Ø              | Ø               |
|                      | Resposta inespecífica               | S              | S               |
|                      | Ausência de resposta inespecífica   | §              | §               |

**Figura 3:** Símbolos audiométricos recomendados[3].

### 3. DESENVOLVIMENTO

Na presente seção serão descritas as etapas para a concepção e validação do ATLe. Todos os processos descritos foram executados ciclicamente usando como base o Método Ágil [5].

#### 3.1 Modelagem de software

Para a modelagem foram utilizados alguns conceitos da UML (Linguagem de Modelagem Unificada), sendo essa uma das padronizações mais utilizadas para se modelar *softwares*.

Por meio do diagrama de caso de uso de sistema (Figura 4), exemplifica-se de maneira visual in-



formações superficiais sobre inserção do novo módulo, que não introduz apenas um novo fluxo no perSONA mas também provoca alterações no módulo de apresentação dos resultados. Tendo

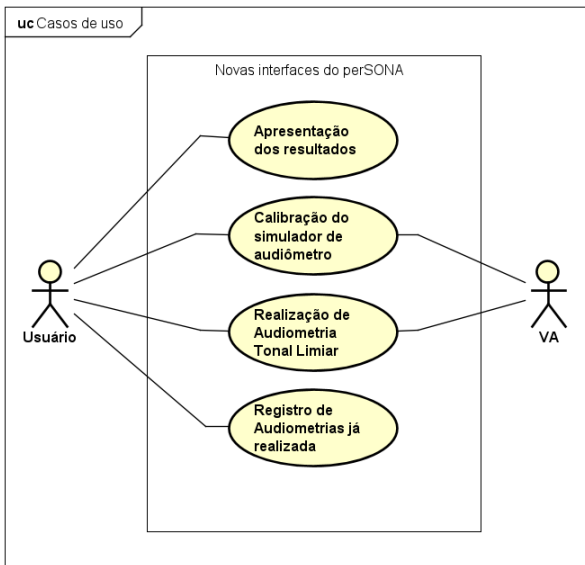


**Figura 4:** Diagrama de casos de uso referente às novas funcionalidades. O VA é um *framework* externo ao perSONA, usado para sintetização das fontes sonoras e reprodução sonora dos sinais que serão utilizados na calibração psicoacústica e realização da ATL.

em vista a inserção do novo módulo, foram desenvolvidos três diagramas de atividades, referentes aos processos de calibração psicoacústica (Figura 5), realização da ATL no *software* perSONA (Figura 6) e análise de resultados (Figura 7).

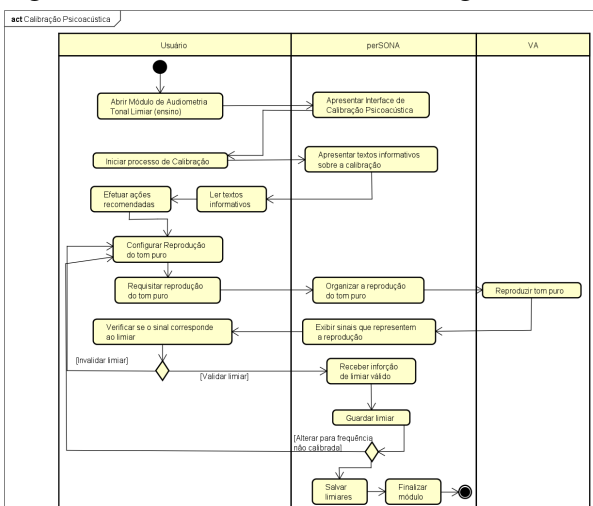


**Figura 5:** Diagrama de atividades referente à interface de calibração psicoacústica.

### 3.2 Programação

A presente etapa descreverá como foram gerados os sinais sonoros utilizados no ATLe, bem como,

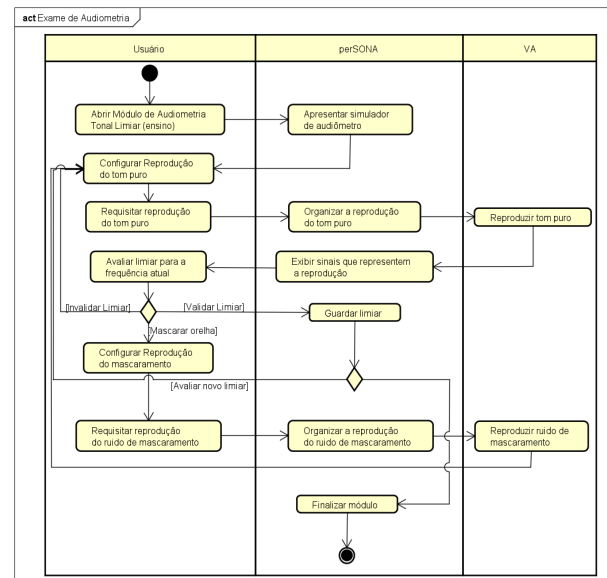


**Figura 6:** Diagrama de atividades referente ao processo de ATL realizado no perSONA.

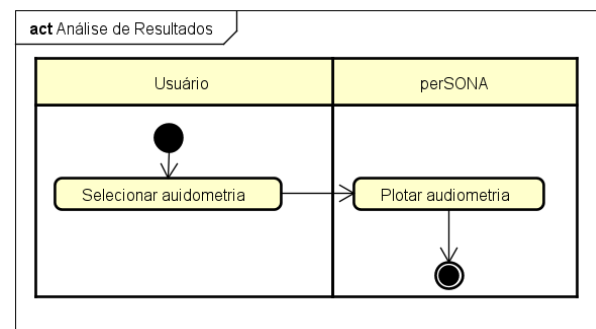


**Figura 7:** Diagrama de atividades da análise de resultados.

as novas interfaces desenvolvidas.

#### 3.2.1 Geração dos sinais

Os sinais a serem utilizados pelo módulo são tons puros e ruídos de mascaramento, e foram criados usando o *software* MATLAB com uma frequência de amostragem de 44,1 kHz. Os ruídos de mascaramento são ruídos de banda estreita, com largura de banda de 1/3 de oitava e centralizados nas respectivas frequências dos tons puros, respeitando a norma ANSI S1.11.

#### 3.2.2 Criação do software

Inicialmente foram criados os *Windows Forms* (interfaces, Figura 8) utilizando ferramentas da plataforma Visual Studio 2019, e conceitos de programação orientada a objetos (POO).

Utilizaram-se principalmente três diferentes ferramentas do Visual Studio: a) “Caixa de Ferramentas”, b) navegação para visualizar e editar os



**Figura 8:** Interface para a criação gráfica dos formulários.

Windows Forms graficamente, e c) controle das propriedades.

Para todos os eventos correspondentes a cada objeto, foram desenvolvidos códigos em C# para serem executados assim que o evento for acionado, conforme exemplo no Código 1. Foi feito extenso uso de bibliotecas do C#.

**Código 1:** Exemplo de declaração de variáveis e tratamento de eventos em C#.

```
public partial class manualAudiometricTest : Form
{
    private readonly IvAInterface vAInterface;

    public double[] intensitRef = new double[11];
    public double[] maskIntensitRef = new double[11];

    public double currentVolumePower = 0;
    public double currentMaskVolumePower = 0;
    public bool isVAConfigured = false;

    // ...Demais variáveis...

    private void changeSide_Click(object sender, EventArgs e)
    {
        if (Side == "Left")
        {
            sideLightLeft.BackColor = Color.Silver;
            sideLightRight.BackColor = Color.Yellow;
            Side = "Right";
        }
        else
        {
            sideLightLeft.BackColor = Color.Yellow;
            sideLightRight.BackColor = Color.Silver;
            Side = "Left";
        }
        updateCorrectAnswers(correctAnswers = 0);
    }

    // ...Demais funcionalidades...
}
```

### 3.3 Geração e disponibilização do instalador

Para facilitar o uso ao novo software, um instalador do perSONA foi gerado por meio do *software* Advanced Installer, permitindo definir as funcionalidades e arquivos do projeto que serão instalados no computador dos usuários após execução do instalador. O instalador, compatível com Windows 64 bit foi disponibilizado na página <https://persona.ufsc.br>

### 3.4 Validações

A fim de validar as novas funcionalidades do perSONA ocorreram cinco diferentes processos, sendo três destinados a obter resultados objetivos e os outros dois resultados subjetivos. Os métodos utilizados para realização desses processos de validação serão descritos na presente seção.

#### 3.4.1 Usabilidade

Dois diferentes métodos foram utilizados para avaliar a usabilidade do novo módulo, bem como, obter *feedback* dos usuários. Inicialmente o módulo foi disponibilizado para o uso em parte da disciplina de “Investigação em Audiologia”, disciplina ministrada na terceira fase do curso de Fonoaudiologia da UFSC. Ao finalizar o uso do perSONA na disciplina, um formulário eletrônico com perguntas referente à usabilidade e opiniões sobre a nova funcionalidade foi enviado aos usuários (alunos).

Ocorreram também *focus group discussions* realizadas por meio da plataforma Google Meet. As discussões contaram com a participação de discentes e docentes do curso de Fonoaudiologia, além de, participantes da equipe perSONA das diferentes áreas do conhecimento.

#### 3.4.2 Linearidade da reprodução sonora

O processo de validação da reprodução sonora parte do princípio que no processo da avaliação audiológica, a alteração de nível de audição  $\Delta L_{aud}$  ajustada no *software* deve corresponder necessariamente à mesma variação de nível de audição no ouvinte. Para isso, a alteração de nível de audição  $\Delta L_{aud}$  ajustada no *software* deve corresponder à mesma variação do nível de pressão sonora  $\Delta L_p$ , MAE produzida pelo fone de ouvido no meato



acústico externo (MAE) do indivíduo, tal que:

$$\Delta L_{\text{aud, software}}(f) \stackrel{!}{=} \Delta L_{\text{p, MAE}}(f). \quad (3)$$

A validação do software consiste portanto na validação da condição expressa pela Equação (3). Os  $L_{\text{p, MAE}}(f)$  correspondentes a cada  $L_{\text{aud, software}}(f)$  foram verificados usando-se um manequim KEMAR da GRAS [6], equipado com simuladores de meato acústico externo e simulador de impedância.

Para simular as diversas configurações de *hardware* nos quais o perSONA pode rodar, os testes foram realizados utilizando diferentes computadores. Também foram utilizados diferentes fones de ouvido, desde fones de ouvido específicos para exames (Sennheiser HDA 300) e fones comuns de alta (Sennheiser HD 580) e baixa qualidade (C3Tech). Estes fones foram posicionados no manequim, conforme se verifica na Figura 9. Para redução de interferência de ruídos, os testes foram realizados dentro de uma sala com elevado isolamento sonoro. Para simular as condições reais de uso do *software* perSONA, o sistema de reprodução sonora era calibrado, utilizando a interface de calibração psicoacústica<sup>1</sup> do perSONA.

O sinal dos microfones nos MAE do manequim foi adquirido e digitalizado por meio do gravador/ADC Squadriga II (head-acoustics, Alemanha) com uma taxa de amostragem de 48 kHz, resolução de 24 bit e utilizando uma faixa dinâmica de -26 dBV. Os sinais adquiridos, em formato proprietário .hdf, foram analisados por meio do *software* ArtemiS SUITE12 (head-acoustics, Alemanha), determinando o NPS  $L_{\text{p, MAE}}$  e consequentemente as variações  $\Delta L_{\text{p, MAE}}$  resultantes das variações dos níveis de audição  $\Delta L_{\text{aud, software}}$  ajustados no *software* perSONA.

Antes de cada medição foi realizada a gravação do ruído de fundo com o fone de ouvido devidamente ajustado no manequim. Essa gravação posteriormente serviu como base para descartar algumas medições por serem consideradas não confiáveis, dado que sofriam interferência desse ruído.



**Figura 9:** Fones de ouvido utilizados para a validação posicionados no manequim KEMAR.

Para cada configuração de sistema de reprodução (computador em conjunto com fone de ouvido e o manequim) foram então realizadas gravações do sinal sonora no interior do MAE do manequim em todas as frequências proporcionadas pelo módulo, com níveis de audição  $L_{\text{aud, software}}$  variando de -10 dB[NA] até 90 dB[NA] em intervalos de 5 dB[NA]. Após o final das gravações dos tons puros, novamente o ruído de fundo foi gravado com o fone de ouvido devidamente ajustado no manequim, para conferir novamente eventual influência do ruído de fundo nos resultados.

Os sinais gravados em formato .hdf foram analisados por meio do *software* ArtemiS SUITE. Para facilitar a análise do NPS dos tons puros, em cada sinal analisado era aplicado um filtro passa banda, com frequência central que correspondia a frequência do tom puro. Foram extraídos as médias de NPS em cada frequência. Optou-se pela média em vez do pico, para desconsiderar a parte transitória do sistema de reprodução sonora (sistema de segunda ordem com *overshot*). Além disso, utilizou-se o janelamento *flat top*, visto que o sinal era um tom puro é o objetivo da análise era determinar o NPS exato nesta frequência. Ruído de fundo foi considerado irrelevante sempre que a relação

$$L_{\text{p, rf}} + 10 \text{ dB} \leq L_{\text{p, sinal}} \quad (4)$$

fosse satisfeita, sendo  $L_{\text{p, rf}}$  o NPS do ruído de fundo e  $L_{\text{p, sinal}}$  o NPS do sinal tonal medido, ambos em dB[NPS]. Medições que não atendiam ao critério da Eq. (4) eram descartadas.

Ainda, durante esse processo de validação percebeu-se que o *driver* de áudio instalado por padrão no sistema operacional Windows fizesse que a relação entre os níveis de audição  $L_{\text{aud, software}}$  ajustados no perSONA e os níveis de pressão sonora  $L_{\text{p, MAE}}$  medidos no MAE do KE-

<sup>1</sup>A interface de calibração tem o objetivo de obter o limiar auditivo do usuário e baseado neste realizar a calibração do sistema. Para tanto, essa limiar será utilizado como limiar padrão para o perSONA, ou seja, para que o 0 dB[NA] de cada frequência possa ser definido

MAR fossem não-lineares, dado que, tal *driver* conta com equalizadores que incluem compressores. Estes compressores comprimem a faixa dinâmica de reprodução, de forma intencional. Tendo em vista que isso é inaceitável para um simulador de audiômetro que deve respeitar a Equação (3), os testes foram retomados após instalação de um *driver* de áudio. O **ASIO4ALL** na versão 2.14 foi utilizado por não tem equalizadores que comprimem a reprodução de algumas faixas de frequências, o que o torna um *driver* apropriado para a reprodução de sinais sonoros precisos.

### 3.4.3 Interferência da distorção harmônica nos sinais reproduzidos

O processo de avaliação da interferência harmônica foi realizado com base nas medições supracitadas. Entretanto, os métodos de análise de sinais utilizados foram diferentes, principalmente por não se fazer o uso de filtros, pois nessa etapa todo o sinal é de interesse para avaliação, já que o paciente sob avaliação na audiometria está exposto ao sinal como um todo, tanto da frequência fundamental com as harmônicas. Para mensurar a interferência da distorção harmônica dois diferentes parâmetros foram avaliados.

#### 3.4.3.1 Interferência da distorção harmônica nos níveis do sinais

Para essa avaliação foi comparado o NPS da frequência fundamental  $L_{p, MAE}(f_0)$  com o NPS total do sinal  $L_{p, total, MAE}$ , este último obtido por soma energética de todas as componentes. Idealmente, em um sistema sem distorção excessiva, o NPS da fundamental  $L_{p, MAE}(f_0)$  deve ser o mais próximo possível ao NPS total do sinal  $L_{p, total, MAE}$ , garantindo assim que as harmônicas geradas pela distorção não interfiram na percepção sonora do paciente, e portanto não interfiram no exame de audiometria tonal para verificação do limiar da audição.

Assim, para que isso pudesse ser avaliado, foi calculada e apresentada de forma gráfica o espectro de magnitude do sinal gravado no MAE do manequim, que corresponde a medição feita. Junto a isso o NPS total  $L_{p, total, MAE}$  do sinal foi calculado, utilizando o *software* ArtemiS SUITE.

Classificou-se, os sinais em aqueles sinais sujeitos a um acréscimo do NPS causado pelas harmô-

nicas entre 0,5 dB[NPS] e 1 dB[NPS], e aqueles sinais nos quais existe aumento superior a 1 dB[NPS], tendo em vista que 1 dB é a diferença no limiar do observável para o NPS de tons puros.

#### 3.4.3.2 Interferência da distorção harmônica nas frequências do sinais

A validação consiste em mensurar a distorção harmônica total (THD), para quantificar a interferência das demais frequência sobre o tom puro. Vale ressaltar novamente que o tom puro a ser reproduzido no MAE do paciente (e do manequim) deveria ter apenas uma única frequência, e uma distorção harmônica demasiada pode fazer com que apareçam harmônicas com NPS muito elevados e próximos ao NPS da fundamental, fazendo com que o sinal sonoro a reproduzido não seja mais considerado um tom puro.

## 4. RESULTADOS

Diate do que foi apresentado diferentes resultados puderam ser obtidos.

### 4.1 Arquitetura principal

A partir do método descrito foi possível desenvolver no perSONA diversas interfaces gráficas que contam com diferentes funcionalidades. As funcionalidades estão dispostas em três diferentes interfaces e podem ser separadas por três diferentes grupos: Funcionalidades de Calibração Psicoacústica, Funcionalidades para a Realização da Audiometria Tonal Limiar e Funcionalidades de Análise dos Resultados das ATL.

#### 4.1.1 Funcionalidades de calibração psicoacústica

Ao utilizar o módulo ATLe pela primeira vez é necessário realizar a calibração psicoacústica (Figura 10), para que o limiar padrão possa ser estabelecido.

Durante a etapa de calibração psicoacústica o usuário deve salvar a potência correspondente ao seu limiar em cada frequência. Assim, o usuário estabelece a base para o limiar padrão considerado no *software*, padrão que será utilizada posteriormente para a realização das audiometrias.

A interface de calibração psicoacústica (Figura 10) conta com diferentes objetos que proporcionam:

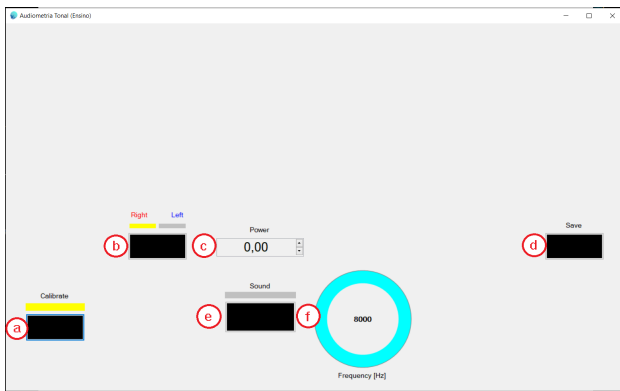


**Figura 10:** Interface para a calibração psicoacústica.

- (a) o botão “Calibrate”, que aciona as funcionalidades de calibração, somente está visível para o usuário quando o sistema está descalibrado, condição que impede realizar audiometrias pelo perSONA;
- (b) botão “Right/Left” é utilizado para alternar o canal, e com isso a orelha, no qual será reproduzido o tom puro. Durante a calibração o botão é necessário para que se possa calibrar o sistema em conformidade com limiar da melhor orelha do usuário, considerando que em muitos casos o usuário tem perda auditiva em uma das orelhas, o que poderia causar problemas durante as avaliações;
- (c) ajuste de “Power” que permite ao usuário alterar a potência do tom puro, de tal forma que o usuário ajuste a potência correspondente ao seu limiar auditivo;
- (d) botão “Save” responsável por salvar o limiar do usuário após a calibração. Essa potência corresponderá então a 0 dB[NA] nesta mesma frequência, e ao mesmo tempo corresponde a algum nível de pressão sonora (dB[NPS]) que dependerá da audição do usuário;
- (e) enquanto pressionado, o tom puro com a potência (Item (c)) e a frequência (Item (f)) selecionada é reproduzido;
- (f) apresentação da frequência que está sendo calibrada no momento. A frequência a ser calibrada varia automaticamente ao salvar o limiar na frequência anterior. No presente módulo são calibradas todas as frequências possivelmente utilizadas na ATL, sendo essas de 8000 Hz, 6000 Hz, 4000 Hz, 3000 Hz, 2000 Hz, 1500 Hz, 1000 Hz,

750 Hz, 500 Hz, 250 Hz e 125 Hz, nesta ordem <sup>2</sup>.

Após a calibração, nos acessos futuros do módulo ATLe, será apresentada uma interface, que permite a realização da ATL.

#### 4.1.2 Funcionalidades para a realização da audiometria tonal limiar

A interface para realização da ATL apresenta diversos objetos (Figura 11), sendo cada objeto responsável por diferentes ações, conforme descrito na sequência.

- (a) Seletor “Air/Bone” é utilizado para alterar entre audiometria por via aérea e óssea. Idealmente a audiometria por via óssea seria realizada com auxílio de vibradores ósseos no lugar de fones de ouvido. Entretanto, como os usuário comumente não dispõem de vibradores ósseos, o módulo nessa configuração apenas é utilizado para representar o exame visualmente, alterando os símbolos que serão salvos no audiograma. Entretanto, a funcionalidade de audiometria por via aérea reproduz os tons puros para o paciente e apresenta os limiares do paciente ao usuário;
- (b) seletor “Right/Left” é utilizado para alternar o canal de reprodução, ou seja a orelha a ser estimulada. Se o lado direito estiver ativado (luz de “Right” acesa) os tons puros serão reproduzidos no lado direito do fone de ouvido, enquanto o ruído de mascaramento, se for acionado, será reproduzido no lado esquerdo;
- (c) contador dos estímulos detectados, para ajudar o fonoaudiólogo na contagem e tendo em vista que o limiar é definido apenas após o paciente identificar 50% ou mais dos estímulos sonoros apresentados;
- (d) “Mask on/off” para acionar ou desligar o ruído de mascaramento. O ruído de mascaramento será acionado sempre para a ore-

<sup>2</sup> A calibração é feita para as frequências em ordem decrescente por conta da dificuldade que os reprodutores sonoros (principalmente os de baixa qualidade) tem em reproduzir baixas frequências, o que poderia causar confusões aos usuários pois poderiam achar que a interface não funciona. Começando com frequências altas se garante que o usuário entenda o funcionamento do procedimento.

lha contralateral à orelha estimulada por tom puro;

- (e) botão “Save” responsável por plotar no audiograma o limiar obtido na frequência e com nível auditivo do tom puro selecionado. O limiar será plotado no audiograma correspondente ao lado de reprodução selecionado (Item (b)), e com os símbolos audiológicos padronizados;
- (f) ajuste do nível de audição  $L_{\text{aud}}$  dos tons puros que serão reproduzidos;
- (g) botão “Sound”, que enquanto pressionado resulta na reprodução do tom puro com o nível de audição (Item (f)) e a frequência selecionada (Item (h));
- (h) controle da frequência dos tons puros e frequência central do ruído de mascaramento que serão reproduzidos;
- (i) controle do nível de audição do ruído de mascaramento. Vale ressaltar que o botão somente funcionará se o mascaramento estiver ativo;
- (j) botão “Undo”, para reverter a última ação realizada pelo botão “Save” (Item (e));
- (k) botão “Finish” para finalizar a audiometria e realizar o salvamento dos resultados do exame em formato JSON, que posteriormente pode ser analisado em outro módulo complementar do *software* perSONA.

#### 4.1.3 Funcionalidades de análise dos resultados das ATL

De maneira complementar ao módulo ATLe, foi necessário desenvolver uma interface para a análise dos resultados (Figura 12) obtidas nos exames de audiometria. Tal interface foi desenvolvida dentro do módulo de Gerenciamento de Paciente, que existia previamente no perSONA.

A nova interface permite que os usuários visualizem os resultados das audiometrias realizadas. Possibilita ainda que haja o cadastramento de audiometrias realizadas fora do perSONA, que em caso de uso clínico é algo de extrema importância para se ter todo histórico de audiometrias de um determinado paciente. Em caso de uso educacional, proporciona ao docente a possibilidade de

criar casos fictícios de audiometria para que sejam replicados ou analisados pelo aluno.

Na Figura 12 alguns elementos da interface em questão podem ser identificados:

- (a) “Seletor de audiometrias” permite selecionar as audiometrias a serem apresentadas na interface. Se apenas uma audiometria for selecionada essa é apresentada em termos do audiograma e em termos dos valores das variáveis “Data da realização” (do exame) (Item (b)), “Via” (“Aérea”, “Óssea (mastóide)”, “Óssea frente” ou “Campo livre”) <sup>3</sup> (Item (c)) e “Orelha estimulada” (esquerda ou direita) (Item (d)). Há ainda a possibilidade de seleção múltipla, podendo ser realizada por meio do clique do mouse e pressionando também a tecla Ctrl. Caso ocorra a seleção de múltiplas audiometrias alguns itens (Item (b) até Item (g)) desaparecem para o usuário, e as curvas dos múltiplos limiares são sobrepostas no audiograma <sup>4</sup>;
- (b) campo “Data de realização” apresenta a data de realização da audiometria selecionada. Caso o usuário tenha interesse em registrar uma audiometria que não fora realizada com o perSONA, deve informar aqui a data em que essa foi realizada;
- (c) seletor “Via” para seleção/apresentação da via em que foi realizada a audiometria. Caso uma audiometria cadastrada no perSONA seja selecionada o controle apresenta a via avaliada nessa audiometria, podendo ser via aérea ou via óssea na mastóide. Entretanto, caso o usuário tenha interesse em registrar uma audiometria que não fora realizada com o perSONA, deve informar aqui a opção “Aérea”, “Óssea (mastóide)”, “Óssea frente” ou “Campo livre”;
- (d) seletor “Lado”, para escolher a orelha da audiometria. Usado na apresentação de dados

<sup>3</sup>É importante ressaltar que a “Via Aérea” é utilizada para representar ATL realizadas por via aérea com fones de ouvido e não há a opção de realizar audiometrias com “Via Campo livre”, que usam caixas de som

<sup>4</sup>Se um usuário selecionar para a análise, audiometrias com a mesma orelha, via e procedimento, ficará muito difícil distinguir as audiometrias pelo gráfico. Entretanto, o procedimento mais utilizado é comparar audiometrias na mesma orelha em diferentes vias, que são distintas pelos símbolos.

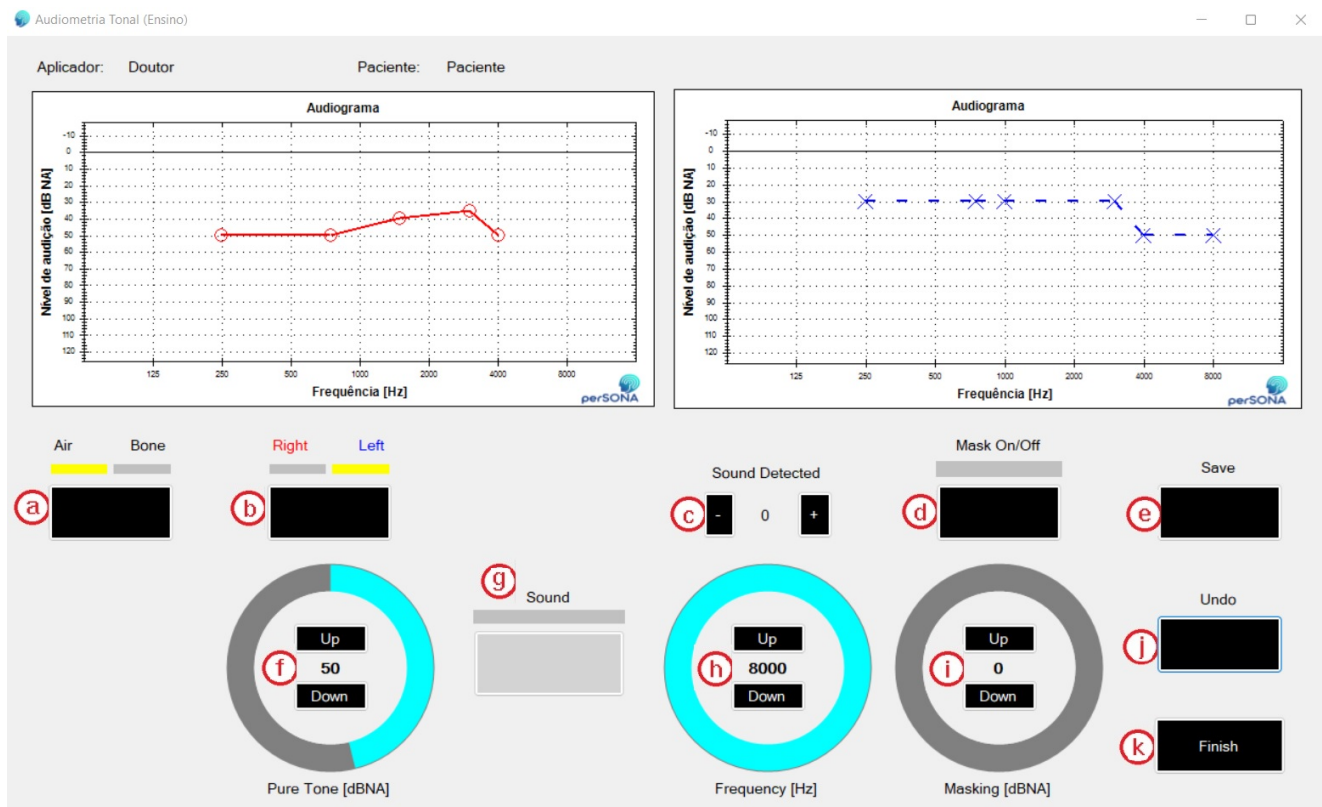


**Figura 11:** Interface para a realização de audiometrias (modalidade ensino).



**Figura 12:** Interface para análise de audiometrias e registro de audiometrias realizadas fora do perSONA.

referentes a uma audiometria ou para o registro de uma audiometria já realizada;

(e) “Pré-visualização” permite uma pré-visualização gráfica dos dados de uma

audiometria que está sendo registrada. Os dados são obtidos dos itens (c), (d) e dos itens em (h) da mesma interface;

(f) “Cadastro de uma audiometria” a partir das

modificações do usuário nos itens de (b) até (d) e dos itens (h), salvando os dados em formato JSON e tornando os mesmos acessíveis para análises posteriores;

- (g) “Deletar audiometria” para apagar a(s) audiometria(s) selecionada(s) (Item (a));
- (h) o presente conjunto de itens é utilizado exclusivamente para o cadastro de novas audiometrias. Para isso, o usuário deve informar o nível de audição (dB[NA]) e de mascaramento em cada frequência correspondente a audiometria que se deseja cadastrar, informar ausência de resposta<sup>5</sup> e informar as frequências efetivamente utilizadas;
- (i) itens com o objetivo de salvar em formato de imagem ou imprimir o audiograma plotado.

## 4.2 Salvando os arquivos de exames

Assim que ocorre a conclusão de uma ATL pelo módulo ATLe é gerado um arquivo em formato JSON. O arquivo é salvo em uma pasta selecionada previamente pelo usuário.

A audiometria registrada tem portanto campos de informações referentes à data de realização da audiometria, frequências utilizadas, níveis de audição correspondentes a cada frequência, via em que a audiometria foi realizada (via aérea, campo livre, ...), em qual das orelhas a audiometria foi realizada (direita ou esquerda), nível auditivo do mascaramento e se há ou não ausência de resposta.

O registro de dados de audiometrias no formato JSON permite a criação de casos clínicos fictícios por parte dos docentes, que posteriormente podem enviar aos alunos arquivos de audiometrias fictícias correspondente a um paciente fictício. O aluno que receber os arquivos pode inseri-los em sua pasta de resultados. Assim, ao abrir o perSONA, terá a possibilidade de carregar e visualizar todos os casos fictícios correspondentes a um determinado paciente. Vale ressaltar que existem

diferentes arquivos para pacientes e audiometrias e que esses arquivos estão internamente ligados, de forma que, se o usuário inserir um paciente e uma audiometria desse paciente o perSONA irá se encarregar de fazer essa ligação.

## 4.3 Avaliações subjetivas

Após a publicação da versão 1.6 do perSONA que continha o módulo ATLe realizou-se duas diferentes avaliações subjetivas com os usuários do perSONA. As avaliações, como descrito anteriormente, foram realizadas por meio de um questionário eletrônico e *focus group discussion*. Na presente seção serão apresentados os resultados dessas avaliações.

### 4.3.1 Resultados do questionário eletrônico

Por meio do questionário eletrônico foram obtidas 26 respostas, todas de usuários da terceira fase do curso de Fonoaudiologia da UFSC que estavam cursando a disciplina “Investigação em Audiologia”, disciplina na qual o novo módulo do perSONA foi utilizado. Na avaliação, a facilidade de uso do software foi classificada com nota maior ou igual a quatro por 92,3% dos usuários em uma escala de um a cinco, sendo cinco o mais fácil. Quanto ao suporte disponibilizado pela equipe, 100% dos usuários classificaram com nota maior ou igual a quatro em uma escala de um a cinco, sendo a nota cinco um suporte muito satisfatório.

Sobre os problemas relacionados ao módulo, 38,5% dos usuários encontraram problemas computacionais, mas 80% desses problemas foram solucionados em novas versões. Os demais erros estão relacionados ao travamento do programa e a não reprodução do sinal sonoro selecionado. Tais erros podem ser causados tanto por defeitos relacionados a performance do perSONA, bem como a problemas na máquina do usuário. Por fim, 96% dos usuários classificaram o novo módulo como sendo útil para o ensino de Audiometria Tonal Limiar.

### 4.3.2 Focus group discussion

Nesta etapa, foram obtidas algumas sugestões para melhorias das primeiras versões do módulo ATLe. Entre as sugestões constaram:

- a criação de um botão que permite deletar apenas a última frequência registrada no módulo ATLe. Esse novo botão já foi adicionado.

<sup>5</sup>Pode ocorrer em um exame audiológico quando a cadeia de reprodução sonora não é capaz de gerar um sinal sonoro com nível auditivo correspondente ao limiar do paciente. Normalmente isso ocorre em avaliações de pacientes com surdez profunda que necessitam de elevados níveis de audição para terem sensação auditiva. O conjunto de controles tem o objetivo de definir essa peculiaridade durante o registro de uma audiometria.



nado na mais recente versão do perSONA, sendo o Item (j) da Figura 11;

- a possibilidade de visualização de diferentes gráficos (limiares) no mesmo audiograma durante a apresentação resultados do módulo de Gerenciamento de Paciente. Essa funcionalidade também já está implementada na última versão do perSONA.

Algo levantado durante essa etapa de validação que ainda não está implementada no perSONA é a separação dos limiares de cada orelhas em dois diferentes audiogramas durante a análise dos exames realizados no módulo de Gerenciamento de Paciente.

#### 4.4 Avaliações objetivas

A fim de avaliar algumas características acústicas dos sinais reproduzidos, foram realizadas algumas avaliações objetivas.

##### 4.4.1 Linearidade da reprodução sonora

Ao analisar os dados obtidos na avaliação da Linearidade da Reprodução Sonora evidenciou-se, ao desconsiderar os sinais que sofrem o efeito do ruído de fundo, que a alteração de 5 dB[NA] no *software* provoca em média uma alteração de 4,8 dB[NPS] no meato acústico externo do manequim, com desvio padrão de 2,2 dB[NPS].

Observou-se ainda que os piores resultados (maior discrepância entre a variação feita no *software* e a variação de NPS obtida) foram encontrados para níveis de pressão sonora acima de 90 dB[NPS]. A piora a partir dos 90 dB[NPS] é ocasionada pelas limitações dos sistemas de reprodução sonora utilizados, tanto no que diz respeito às placas de som dos computadores, que não estão preparados para lidar com elevados níveis de pressão e potência, como também os fones de ouvidos.

##### 4.4.2 Interferência da distorção harmônica nos níveis dos sinais

De forma geral, com base nas mais de 1300 medições realizadas não foi verificada interferências da distorção harmônica nos níveis dos sinais sonoros a ponto de comprometer a avaliação auditiva. Apenas em casos isolados em algumas poucas combinações de fones e computadores foi evidenciada um aumento do NPS devido às harmôni-

cas, sendo que para alguns desses sinais o acréscimo em termos de NPS foi entre 0,5 dB[NPS] e 1 dB[NPS] (Figura 13) e em outros casos maior 1 dB[NPS] (Figura 14). É importante ressaltar as pouquíssimas interferências se manifestaram apenas para NPS muito elevados, como era esperado.

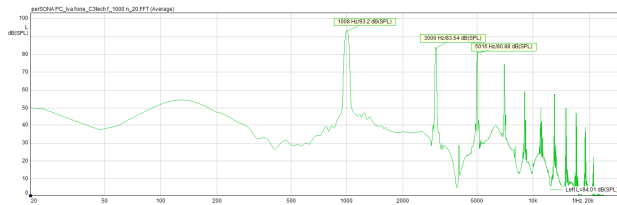
##### 4.4.3 Interferência da distorção harmônica nas frequências dos sinais

Após a avaliação de todos os sinais sonoros, pôde-se evidenciar que a interferência das harmônicas na frequência principal dos sinais sonoros pode ser considerada irrelevantes, à medida que, todos os sinais que não tiveram interferência do ruído de fundo apresentam um THD menor que 0 dB[NPS].

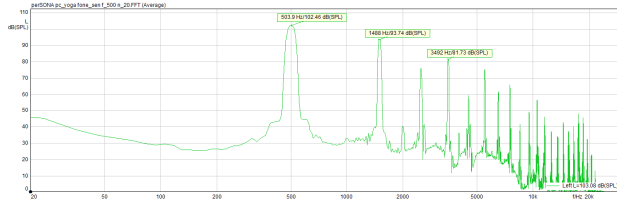
## 5. CONCLUSÃO

O módulo ATLe, além de trazer novas funcionalidade ao *software* perSONA, proporcionou aos alunos da disciplina de “Investigação em Audiologia” um ensino de qualidade no que diz respeito ao manuseio de um audiômetro, bem como, da realização de exames na área de audiologia clínica.

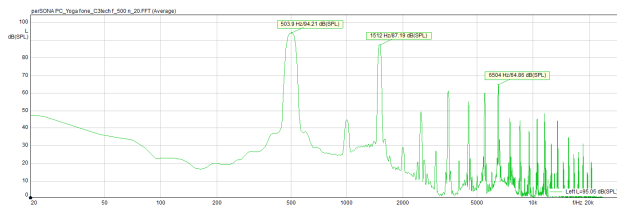
O módulo desenvolvido, embora tenha algumas limitações no que tange a reprodução de sinais sonoros de elevados níveis de potência, ainda se firma como uma ferramenta útil no que diz respeito ao ensino da ATL, tendo em vista que muito raramente serão utilizados elevados níveis de potência para a prática de ensino. Ainda, além de ser um módulo interativo e de fácil usabilidade, a confiabilidade dos níveis de reprodução é o grande diferencial do módulo ATLe, pois permite ao estudante trabalhar a sua percepção auditiva. Algo de extrema importância para profissionais da área e que normalmente não é abordado em outros *software* destinados ao mesmo propósito. Com a volta do ensino presencial, o módulo desenvolvido está sendo um complemento no ensino de ATL.



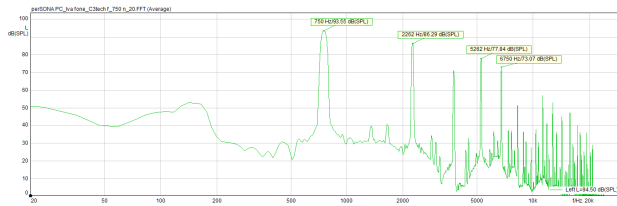
(a)  $L_{p, \text{total}, \text{MAE}} - L_{p, \text{MAE}}(1 \text{ kHz}) = 0,81 \text{ dB [NPS]}$



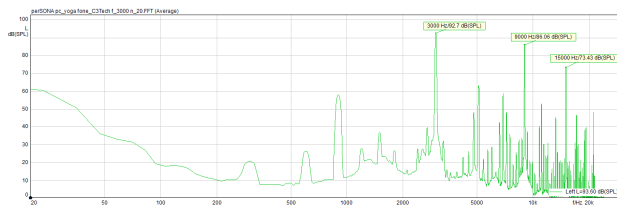
(b)  $L_{p, \text{total}, \text{MAE}} - L_{p, \text{MAE}}(500 \text{ Hz}) = 0,62 \text{ dB [NPS]}$



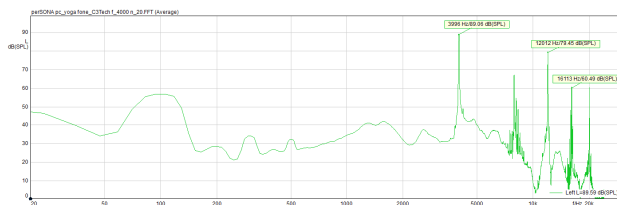
(c)  $L_{p, \text{total}, \text{MAE}} - L_{p, \text{MAE}}(500 \text{ Hz}) = 0,84 \text{ dB [NPS]}$



(d)  $L_{p, \text{total}, \text{MAE}} - L_{p, \text{MAE}}(750 \text{ Hz}) = 0,95 \text{ dB [NPS]}$

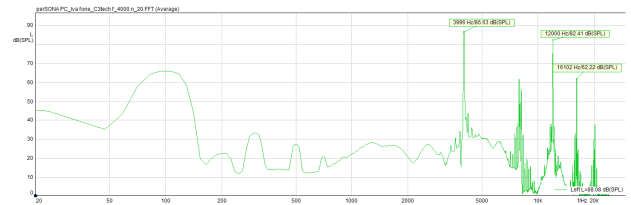


(e)  $L_{p, \text{total}, \text{MAE}} - L_{p, \text{MAE}}(3 \text{ kHz}) = 0,9 \text{ dB [NPS]}$

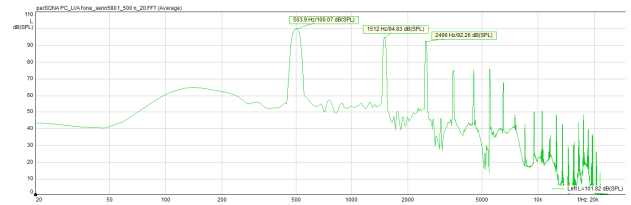


(f)  $L_{p, \text{total}, \text{MAE}} - L_{p, \text{MAE}}(4 \text{ kHz}) = 0,53 \text{ dB [NPS]}$

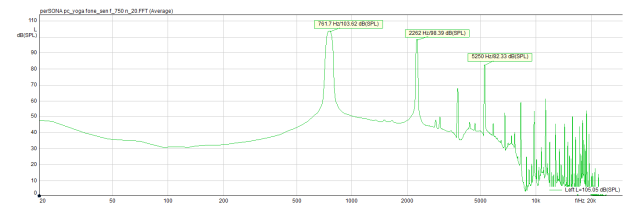
**Figura 13:** Espectros de magnitude  $L_{p, \text{MAE}}$  mostrando interferência harmônica utilizando fones de ouvido C3Tech em diferentes computadores, resultando em  $L_{p, \text{MAE}}(f_0) + 1 \text{ dB} > L_{p, \text{total}, \text{MAE}} > L_{p, \text{MAE}}(f_0) + 0,5 \text{ dB}$ .



(a)  $L_{p, \text{total}, \text{MAE}} - L_{p, \text{MAE}}(4 \text{ kHz}) = 1,45 \text{ dB [NPS]}$  usando fone C3Tech



(b)  $L_{p, \text{total}, \text{MAE}} - L_{p, \text{MAE}}(500 \text{ Hz}) = 1,75 \text{ dB [NPS]}$ , usando fone Sennheiser HD 580



(c)  $L_{p, \text{total}, \text{MAE}} - L_{p, \text{MAE}}(750 \text{ Hz}) = 1,43 \text{ dB [NPS]}$  utilizando fones de ouvido Sennheiser HD 589

**Figura 14:** Espectros de magnitude  $L_{p, \text{MAE}}$  mostrando interferência harmônica, resultando em  $L_{p, \text{total}, \text{MAE}} \geq L_{p, \text{MAE}}(f_0) + 1 \text{ dB}$ .

## REFERÊNCIAS

- [1] Murta, Bernardo Henrique Pereira *et al.* *Plataforma para ensaios de percepção sonora com fontes distribuídas aplicável a dispositivos auditivos: persona*. 2019.
- [2] Paul, S. Material de aula da disciplina FON 7208, 2020.
- [3] Fonoaudiologia, Conselho Federal. *Guia de orientações na avaliação audiológica básica*. Elaboração: Sistema de Conselhos de Fonoaudiologia Colaboração: Sociedade Brasileira de Fonoaudiologia, 2017.
- [4] Lopes, AC; Munhoz, GS; Bozza, A; EM, Boéchat; PL, Menezes; CM, Couto; ACF, Frizzo; RC, Scharlach e ART., Anastasio. *Diagnóstico audiológico*. Tratado de Audiologia, 2:55–178, 2015.
- [5] Wazlawick, Raul. *Análise e design orientados a objetos para sistemas de informação: Modelagem com UML, OCL e IFML*. Elsevier Brasil, 2016.
- [6] Paul, Stephan. *Binaural recording technology: A historical review and possible future developments*. Acta acustica united with Acustica, 95(5):767–788, 2009.