MEDIÇÃO DE FREQUÊNCIAS E CLASSIFICAÇÃO EM GRAVE E AGUDA

Measurement of frequency and classification in bass and sharp

NETO, Maria de Fatima Ferreira
Universidade Paulista

SANTOS, Leonardo Sioufi Fagundes dos Santos
Universidade Federal de São Paulo, Campus de Diadema

RESUMO: Neste trabalho, relacionamos as sensações auditivas de grave e agudo com resultados experimentais de frequência sonora. Exploramos algumas classificações de frequências sonoras na literatura e adotamos a nosso próprio critério. Definimos como divisor entre frequências graves e agudas o valor de 315 Hz. Relatamos a medição da frequência sonora através de um aplicativo de smartphone devidamente validado, identificando e caracterizando tons puros. Medimos e classificamos as frequências de algumas fontes sonoras, nomeadamente, vozes faladas e cantadas, apitos de navios na região do Porto de Santos e sons de mosquitos e cigarras. Propomos a adaptação deste experimento em ambientes de ensino formal e informal. Os experimentos deste trabalho ilustram a facilidade e adaptabilidade da atividade desenvolvida em diversas situações.

Palavras-Chave: acústica; frequência; altura

ABSTRACT: In this work, we relate the auditory sensations of bass and sharp with experimental results of sound frequency. We have explored some classifications of sound frequencies in the literature and adopted them at our own class. We have defined as a divisor between high and low frequencies the value of 315 Hz. We report the measurement of sound frequency through a properly validated smartphone application, identifying and characterizing pure tones. We measure and classify the frequencies of some sound sources, namely spoken and sung voices, whistles of ships in the Port of Santos region and sounds of mosquitoes and cicadas. We propose the adaptation of this experiment in formal and informal teaching environments. The experiments of this work illustrate the ease and adaptability of the activity developed in several situations.

Key-words: acoustic; frequency; pitch

INTRODUÇÃO

O sentido da audição não deve ficar à parte na aprendizagem da acústica. Falar de som sem a audição é tão abstrato quanto abordar textura sem o tato, cores sem visão, odores sem olfato, sabores sem paladar, etc. Em geral, os sentidos são ferramentas fundamentais na aprendizagem. Mesmo o ensino de acústica para surdos exige analogias com as informações de outros dois sentidos, a visão ou tato (FINK, 2009).

Apesar da necessidade da audição no ensino da acústica, os sentidos parecem contrariar muitos conceitos de Física ensinado nas escolas. A Terra que vemos plana, é curva. A matéria que percebemos contínua é formada por átomos. A luz com aparente propagação instantânea tem velocidade finita. É necessário transpor esse hiato entre a realidade sensorial e os conceitos de Física. A aproximação dos conceitos físicos da realidade da população em geral facilita a compreensão dos fenômenos naturais (MIZUKAMI, 1986). Neste trabalho, associamos conceitos de acústica com as sensações auditivas.

Há três sensações subjetivas relacionadas à audição: intensidade, timbre e altura (NUSSENZVEIG, 2014). A intensidade está associada à amplitude da onda. Quanto maior a amplitude da onda sonora, maior a sensação de intensidade. O timbre é a sensação ligada à natureza da fonte sonora. Por exemplo, o som gerado por um piano é diferente daquele proveniente de um violão, mesmo que ambos os instrumentos emitam sons com a mesma frequência e amplitude. Já a altura está relacionada à frequência sonora e traduz a sensação dos sons grave ou agudo (HENRIQUE, 2011).

Este trabalho trata especificamente da frequência do som e da sensação correspondente, a altura, embora as outras características das ondas sonoras e suas respectivas sensações também sejam fundamentais para a compreensão da Acústica. Frequência é o número de ondas que passam por unidade de tempo num ponto fixo do espaço (HECHT, 1991)[1]. A unidade de frequência sonora no Sistema Internacional de Unidades (SI) é o “Hertz”, representado por “Hz”, correspondente à uma onda por segundo. Por exemplo, se um ponto do espaço é atravessado por 400 ondas sonoras a cada segundo, o som tem 400 Hz.

Esta pesquisa consiste na medição de frequências sonoras através de um aplicativo de smartphone e a sua relação com a sensação subjetiva de altura. Por exemplo, um som com frequência de 100 Hz corresponde à sensação de grave ou de agudo?

O objetivo deste trabalho é mostrar a simplicidade da medição de frequências sonoras, tanto do ponto de vista operacional, bem como pela

[1] Há outras formas de expressar a definição de frequência sonora não mencionadas neste trabalho. Seguem algumas referências: (NUSSENSVEIG, 2014; HENRIQUE, 2011; BISTAFA, 2011; BONJORNO; RAMOS, 1999; HALLIDAY; RESNICK, 1999; OKUNO; CALDAS; CHOW, 1986; SOUZA; ALMEIDA; BRANGANÇA, 2009).

facilidade de encontro dos materiais (laptop e smartphone). O procedimento de medição e os materiais necessários estão detalhados posteriormente.

A justificativa desta pesquisa é a dificuldade na compreensão do conceito de frequência. Por exemplo, estudantes do ensino médio chegam à sala de aula com um conceito pré-formado de frequência (DRIVER *et. al.,* 1994). Eles têm noção da frequência da estação de rádio, da voz humana ou da frequência com que vai ao cinema, entre outros. Entretanto, ao especificar uma frequência em 200 Hz, 500 Hz ou 1000 Hz, os estudantes podem não compreender o significado dessas diferentes grandezas. Como interpretar as diferentes frequências sonoras? Como relacioná-las com as sensações auditivas?

Mediremos as frequências de cinco fontes sonoras distintas através de um aplicativo de celular. No entanto, a maioria das fontes sonoras emite uma composição de várias frequências, o que dificulta o estudo desta grandeza através de sons cotidianos. Contornaremos o problema da sobreposição de frequências escolhendo sons tonais. Som tonal é aquele emitido em uma única frequência ou em uma que se sobreponha às demais (ABNT, 2014).

Na seção a seguir, classificamos os sons de acordo com a frequência sonora. Na seção posterior, descrevemos os métodos de avaliação com as particularidades das fontes sonoras selecionadas para este trabalho e a validação do aplicativo utilizado, *frequency counter*. Os resultados e sua respectiva análise são apresentados na seção seguinte. Em sequência, propomos a adaptação do experimento deste trabalho para diversos ambientes. Finalmente, as considerações finais estão na última seção.

CLASSIFICAÇÃO DO SOM CONFORME A FREQUÊNCIA

A percepção das frequências das ondas sonoras é feita pelas células especiais da orelha interna, desde que estejam entre 20 Hz e 20000 Hz (HALLIDAY; RESNICK, 1991). Esse intervalo de frequências é chamado de “faixa audível”. Os sons com frequências abaixo de 20 Hz e acima de 20000 Hz são denominados respectivamente como “infrassons” e “ultrassons” (MEHTA; JOHNSON; ROCAFORT, 1999).

No intervalo dos sons audíveis, as frequências baixas e altas são denominadas respectivamente de graves e agudas. Entretanto, não há uma

classificação única para as frequências. Os diversos critérios de classificação obedecem às necessidades práticas dos problemas tratados. Por exemplo, na acústica aplicada à arquitetura, a faixa de frequências de grande importância para a análise do desempenho de edifícios está entre 100 Hz e 3150 Hz (NETO, 2009). Neste contexto, as frequências são classificadas como baixas, médias e altas respectivamente para os intervalos entre 100 Hz e 315 Hz, entre 315 Hz e 2000 Hz e acima de 2000 Hz (BISTAFA, 2011; NETO, 2009). Na área da otorrinolaringologia, onde a referência de estudos é a sensibilidade da audição humana, as frequências altas são aquelas acima de 10000 Hz, enquanto as demais são baixas (CARVALLO *et. al*., 2007). Na fonoaudiologia, o divisor entre as frequências baixas e altas é 2000 Hz (RUSSO *et. al.*, 2009).

Há materiais didáticos onde não existe uma classificação precisa das frequências altas e baixas, o que dificulta a apresentação do conceito de frequência grave e aguda para os estudantes. Por exemplo, o livro de Física para o ensino médio de Bonjorno e Ramos (1999) situa o intervalo de frequências da voz masculina entre 100 Hz e 200 Hz, enquanto a feminina está entre 200 Hz e 400 Hz. Além disso, o livro afirma que as vozes masculinas "costumam" ser graves e as femininas, agudas. Apesar de afirmar que os sons graves têm frequência menor do que os agudos, o autor não apresenta nenhuma classificação quantitativa de frequência alta ou baixa.

Diante da falta de uma classificação padrão para frequências graves e agudas, neste trabalho, usaremos um critério próprio. As frequências serão classificadas apenas como graves ou agudas, excluindo a denominação "frequências médias". Frequências abaixo de 315 Hz serão chamadas baixas ou graves e acima de 315 Hz, altas ou agudas. O valor 315 Hz como marco divisor foi tomado do critério arquitetônico para a separação das frequências graves e médias.

MÉTODO DE AVALIAÇÃO

Para a identificação das frequências das fontes sonoras foi utilizado o aplicativo para smartphone, *Frequency Counter*. Segundo o fabricante, a exposição ao som em 2 ou 3 segundos é suficiente para medir a frequência. Esse foi o critério para a escolha das fontes sonoras para este trabalho. Usamos as seguintes fontes sonoras: voz humana falada e cantada, apito de

navio e sons de mosquitos e cigarras, sendo algumas reais e outras virtuais.

As fontes sonoras podem ser classificadas em reais e virtuais. As fontes reais são aquelas obtidas diretamente do ambiente, sem gravação alguma. Por exemplo, o som captado em uma música cantada ao vivo é real. Outro exemplo é o som de uma entrevista gravada ao vivo. As fontes virtuais são reproduzidas a partir de uma gravação ou geradas por um simulador computacional. Por exemplo, uma música reproduzida em um vídeo do YouTube, CD, DVD ou pen drive é uma fonte virtual. O som gerado em um simulador computacional também é uma fonte virtual.

As vozes faladas provêm de dois voluntários e de um vídeo do YouTube. Os voluntários foram convidados por terem voz grave e bem afinada. Foi solicitado que emitissem som com a mais baixa frequência possível em um tom constante pelo tempo necessário para a medição. Já o vídeo do YouTube apresenta sons emitidos durante uma meditação tibetana com a sílaba “OM”. Nesse vídeo, nem todos os trechos são passíveis de medição.

As vozes cantadas foram emitidas por CD, DVD e em vídeo disponibilizado no YouTube. Os trechos escolhidos para a medição têm o tempo mínimo com frequência contínua. No entanto, muitos segmentos das músicas apresentavam tempo suficiente, mas não permitiam a medição das frequências por não haver um som tonal.

Os navios emitiam os apitos em 3 repetições, com duração média de 10 segundos, o tempo suficiente para a medição.

Os sons gerados pelos mosquitos e pelas cigarras foram encontrados no YouTube com a condição do tempo mínimo para as medições.

FONTES SONORAS UTILIZADAS NESTE TRABALHO

VOZ HUMANA

A voz humana, seja falada ou cantada, é mais expressiva em altas ou baixas frequências. Quais são os valores dessas frequências? Essa questão foi o gatilho para a medição da voz humana nas duas situações mencionadas.

VOZ FALADA

Segundo Okuno, Caldas e Chow (1986) e Maggi (sd.), geralmente, as

cordas vocais dos homens são mais compridas e possuem mais massa que as das mulheres. Essa é a razão que justifica a frequência fundamental típica da voz masculina em 125 Hz e da voz feminina em 250 Hz. Outros autores, como Ramos (2013), afirmam que a frequência fundamental aproximada em homens adultos varia entre 107 Hz e 130 Hz, e em mulheres adultas, em torno dos 200 Hz a 220 Hz.

De acordo com Maggi (sd.), durante a fala, uma pessoa emite sons que variam entre 300 Hz e 1700 Hz. Segundo Mehta, Johnson e Rocafort (1999), a fala humana utiliza a faixa de frequência que vai de 100 Hz até as proximidades de 5000 Hz. Outros autores consideram a faixa de frequência para a voz sem considerar as notas agudas para o canto, entre 80 Hz e 560 Hz[2]. Le Houche e Allali (1999), consideram que a voz de conversação das mulheres está entre 196 Hz e 392 Hz. Quanto aos homens, utilizam de 65 Hz a 123 Hz.

As informações acima mostram uma grande divergência entre os dados da literatura.

VOZ CANTADA

Os cantores podem ser classificados de acordo com as frequências naturais de suas vozes. Na classificação mais conhecida, um homem pode ser baixo, barítono ou tenor. Um baixo corresponde a um homem com a voz mais grave, um tenor, mais aguda e um barítono, à faixa intermediária. Uma mulher pode ser contralto ou soprano, sendo a primeira aquela com voz grave, e a segunda, aguda. Há ainda subclassificações como contratenores, mezzosoprano, baixo profundo, etc., mas estas subdivisões estão fora do escopo deste artigo. Não há consenso entre os autores sobre a faixa de frequências de cada uma das classes de cantores. A Tabela 1 apresenta algumas classificações dos cantores de acordo com as frequências alcançadas. Há casos de sopranos que superaram os 3000 Hz e baixos que atingiram até 16 Hz[3].

[2] Comunicação pessoal da profa. Ana Carolina Constantini, da Unicamp.
[3] Comunicação pessoal do Físico e Músico William Labecca.

Tabela 1 - Classificação de cantores e faixa de frequência alcançada

	Classe de voz	(COSTA, 2016)	(TEIXEIRA, 2014)	(MAGGI, sd.)
Voz Masc.	**Baixo** - voz masculina mais grave	82,4 – 261,6	87 – 349	80 – 365
	Barítono - é mais grave que a de tenor	98 – 349,2	98 – 392	100 – 450
	Tenor - voz masculina mais aguda	130,8 – 523,3	131 – 494	140 – 540
Voz Fem.	**Contralto:** é a voz feminina mais grave	174,6 – 698,5	175 – 698	180 – 730
	Soprano: é a mais aguda das vozes	523,3 – 3520	247 – 1145	270 – 1230

APITOS DE NAVIOS

O apito de navio (conhecido popularmente como buzina) precisa ser ouvido a grandes distâncias. Esse requisito é preenchido com as frequências baixas, por isso, o som do apito do navio deve ser grave.

Segundo a emenda de 2013 do Regulamento Internacional para Evitar Abalroamentos no Mar de 1972 (RIPEAM 72) editado pela Organização Marítima Internacional (OMI), os sinais sonoros emitidos pelos navios são alertas de perigo, manobra ou aviso em condições de visibilidade reduzida para chamar a atenção (BRASIL, 2013).

Coletamos os dados sobre sons de apitos de navios na cidade de Santos, estado de São Paulo, na calçada da Av. Saldanha da Gama que fica junto ao mar, a cerca de 1000 m do Porto de Santos, em frente à Fortaleza de Santo Amaro da Barra Grande, localizado na Ilha de Santo Amaro, município do Guarujá (*vide* Figura 1). O local escolhido para as medições fica junto ao Canal de Santo Amaro, rota obrigatória de todos os navios que chegam e partem do Porto de Santos, o maior da América Latina.

Figura 1 – Passagem de navio pelo canal de Santo Amaro, com Fortaleza de Santo Amaro da Barra Grande ao fundo. As medições foram feitas na calçada, no lado de Santos. A imagem foi extraída de trecho de vídeo de <http://www.janelas.tv.br/camera-ao-vivo/sp/santos/ponta-da-praia/>, do dia 06-01-2018, com início às 17:51.



INSETOS VOADORES

Insetos voadores como mosquito[4], mosca, abelha, libélula, vespa ou cigarra produzem sons bem característicos. Neste trabalho nos concentramos em apenas dois tipos de insetos, os mosquitos e as cigarras. A escolha destes insetos foi motivada pela emissão de sons intensos e facilmente identificáveis.

MOSQUITOS

O barulho dos mosquitos é perceptível por conta da proximidade do inseto com sua vítima em busca de sangue para se alimentar. Esse barulho é produzido pela alta frequência do batimento das asas (VASCONCELOS, 2011).

CIGARRAS

Ao contrário do mosquito, o ruído produzido pela cigarra não é provocado pelo batimento das asas, mas pela contração dos músculos do órgão cimbálico que os machos possuem. A contração desses músculos faz vibrar uma membrana, produzindo o som característico para atrair as fêmeas (MACCAGNAN, 2008).

VALIDAÇÃO DO APLICATIVO *FREQUENCY COUNTER*

Antes de começar a medir e identificar as frequências, é necessário validar o aplicativo para garantir a confiabilidade das medições. Para isso, foram utilizados dois programas de geração de som por frequência disponíveis gratuitamente na internet, o *sound_pt_BR.jar* do site <https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/sound> e o *Online Tone*

[4] Segundo Consoli e Oliveira (1994, p. 17) “Os mosquitos são insetos dípteros, pertencentes à Família *Culicidae*, conhecidos também como pernilongos, muriçocas ou carapanãs”.

Generator do site <http://www.szynalski.com/tone-generator/>, ambos com acesso em 20 de maio de 2018.

Os geradores de som foram executados em dois laptops de uso doméstico, identificados por PC1 e PC2. As medições no PC1 foram feitas em duas situações diferentes: em uma delas usando a sua própria caixa de som e na outra, uma caixa de som externa conectada ao PC; no PC2, utilizamos somente a caixa de som interna. As frequências específicas foram geradas com tempo suficiente para a medição com o aplicativo. A sobreposição de ondas sonoras com diferentes frequências não permitiu medições para valores abaixo de 100 Hz para o gerador *sound_pt_BR.jar* (*vide* tabela 2). O mesmo empecilho ocorreu com o gerador *Online Tone Generator* para frequências inferiores à 70 Hz (*vide* tabela 3).

O aplicativo é considerado validado se as diferenças entre as frequências indicadas nos simuladores e as medidas estiverem dentro de uma faixa de incerteza de 5%. A validação também leva em consideração a sensibilidade do aplicativo a frequências muito baixas e muito altas.

As Tabelas 2 e 3 apresentam os valores da medição pelo aplicativo respectivamente dos geradores *sound_pt_BR.jar* e o *Online Tone Generator*.

Tabela 2 - Validação do aplicativo com *sound_pt_BR.jar* (Phet). Medições em Hz.

Frequência (Hz)	PC1	PC1 com caixa de som externa	PC2
90	Não foi possível medir	Não foi possível medir	Não foi possível medir
100	Não foi possível medir	100,00	100,00
200	199,55 a 204,17	199,55 a 204,17	199,55 a 204,17
300	300,00	300,00	300,00
400	400,91	400,91	400,91
500	501,14	501,14	501,14
600	595,95 a 604,11	595,95 a 604,11	595,95 a 604,11
700	700,00	700,00	700,00
800	801,82	801,82	801,82
900	900,00	900,00	900,00
1000	1002,27	1002,27	1002,27
2000	Não há no gerador	Não há no gerador	Não há no gerador

Tabela 3 - Validação do aplicativo com *Online Toner Generator*. Medições em Hz.

Frequência (Hz)	PC1	PC1 com caixa de som externa	PC2
70	Não foi possível medir	Não foi possível medir	Não foi possível medir
75	Não foi possível medir	75,00	75,00
80	Não foi possível medir	80,04	80,04
90	Não foi possível medir	90,00	90,00
100	Não foi possível medir	100,00	100,00
200	199,55 a 200,45	199,55 a 200,45	199,55 a 200,45
300	300,00	300,00	300,00
400	400,91	400,91	400,91
500	501,14	501,14	501,14
600	595,95 a 604,11	595,95 a 604,11	595,95 a 604,11
700	700,00	700,00	700,00
800	801,82	801,82	801,82
900	900,00	900,00	900,00
1000	1002,27	1002,27	1002,27
2000	2004,55	2004,55	2004,55

De acordo com os resultados das Tabelas 2 e 3, a medição das frequências pelo aplicativo foi fiel à frequência nominal emitida pelos geradores. A incerteza nas medições é menor do que 0,7%. Portanto, pode-se considerar o uso do aplicativo válido para a realização das medições.

Como a frequência do som depende da fonte, era esperado que as caixas de som internas do PC1 e do PC2 e a caixa de som externa acoplada ao PC1 emitissem a mesma frequência indicada pelos geradores. Essa situação foi comprovada pela repetição dos valores medidos nas três colunas das Tabelas 2 e 3.

Feita a validação do aplicativo, o passo seguinte é a medição nos ambientes real e virtual.

RESULTADOS E ANÁLISE

VOZ HUMANA FALADA

A Tabela 4 apresenta as medições de voz humana falada dos dois voluntários e do vídeo do YouTube com suas respectivas caracterizações. Os

dois primeiros dados são da mesma pessoa em momentos distintos.

Tabela 4 - Voz Humana em sons tonais

Fonte	Frequência (Hz)	Caracterização do som
Voz masculina 1a (ao vivo)[5]	70,0	Grave
Voz masculina 1b (ao vivo) [5]	85,0	Grave
Voz masculina 2 (ao vivo)[6]	83,8	Grave
OM (Meditação tibetana)[7]	123,0	Grave

O primeiro dado da Tabela 4 é ilustrativo, visto que o aplicativo não foi validado para a frequência de 70 Hz (*vide* Tabela 3).

De acordo com nossa classificação, as frequências de todos os sons da Tabela 4 são graves, ou seja, abaixo de 315 Hz.

Apenas a frequência sonora da meditação tibetana está dentro da faixa proposta por Ramos (2013) para vozes masculinas, entre 107 Hz e 130 Hz, enquanto as demais frequências medidas atingiram valores bem abaixo do intervalo apontado por este mesmo autor.

VOZ HUMANA CANTADA

Os trechos das músicas apresentadas na Tabela 5 foram escolhidos pela viabilidade da medição. Além das músicas, a Tabela 5 apresenta os cantores, as frequências e as caracterizações dos sons.

Tabela 5 - Voz humana em música

Música	Cantor	Frequência (Hz)	Caracterização do som
Con te Partiro	Andrea Bocelli (tenor)[8]	445,00	Agudo
Con te Partiro	Jackie Evancho (soprano)[9]	882,00	Agudo

[5] As amostras 1a e 1b foram emitidas por Leonardo Sioufi Fagundes dos Santos, coautor deste trabalho.

[6] A amostra 2 foi emitida pelo Pe. Leomar Nascimento de Jesus.

[7] Fonte: Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=N_Amt83hvhM&feature=youtu.be>. Acesso em: 20 mai 2018.

[8] Fonte: Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=E_0i7Arjep4>. Acesso em: 20 mai 2018.

[9] Fonte: Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=hU56mH_5oe0>. Acesso em: 20 mai 2018.

Hallelujah	John Cale (DVD Filme Shrek, de 2001)	260,65	Grave
Hallelujah	John Cale (DVD Filme Shrek, de 2001)	98,22	Grave
O Mio Babbino	Maria Callas (soprano)[10]	918,75	Agudo
O Mio Babbino	Jackie Evancho (soprano)[11]	848,00	Agudo
Princesa Desalento	Nuno Guerreiro, do grupo Ala dos Namorados, (CD "Solta-se o beijo", de 1999)	1160,53	Agudo
(continua) (continuação)			
Take on Me	Morten Harket, do grupo A-ha (CD "25 The very best of", de 2010)	680,00	Agudo
What a Wonderful World	Louis Armstrong (CD "Edição limitada Louis Armstrong", de 2005)	117,00	Grave

É interessante ressaltar algumas observações sobre os dados da tabela 5 nos parágrafos seguintes.

O mesmo trecho da música "Con te Partiro" foi medido em duas versões distintas, uma do tenor Andrea Bocelli (445,00 Hz) e outra da soprano Jackie Evancho (882,00 Hz). Considerando a incerteza da medição em 0,7%, a frequência de Evancho é praticamente o dobro de Bocelli, ou seja, a diferença entre as notas é de uma oitava[12].

O cantor John Cale em uma parte da música "Hallelujah", cantada para o filme "Shrek", atingiu a menor frequência medida, 98,22 Hz.

A mesma música "O Mio Babbino" foi executada por duas cantoras distintas em épocas diferentes. Em um mesmo trecho da música, a frequência aguda de Maria Callas (918,75 Hz) supera a de Jackie Evancho (848,00 Hz). Em outros trechos da música, as cantoras atingiram frequências ainda mais agudas, mas a medição não foi viável devido à sobreposição de frequências.

O cantor norueguês Morten Harket do grupo "A-ha" consegue atingir alguns falsetes (emissão de voz mais aguda que o normal). No trecho do refrão da música "Take on Me" ("...in a day or two"), o cantor atingiu 680,00 Hz,

[10] Fonte: Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=s6bSrGbak1g >. Acesso em: 20 mai 2018.
[11] Fonte: Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=CqbZEgqxHjw>. Acesso em: 20 mai 2018.
[12] Definição de oitava disponível em (HENRIQUE, 2011).

frequência incomum para a voz masculina e típica de uma contralto (*vide* Tabela 1).

A voz de Nuno Guerreiro, um cantor português do grupo "Ala dos Namorados", é a mais aguda de nossa tabela, superando as sopranos Maria Callas e Jackie Evancho. No trecho final da música "Princesa Desalento", o cantor atinge a frequência de 1160,53 Hz, equivalente a uma soprano (*vide* Tabela 1).

A voz de Louis Armstrong é conhecida por ser grave. Em um trecho da música "What a Wonderful World", a frequência atingida foi de 117,00 Hz. Tanto Louis Armstrong quanto John Cale atingiram frequências ainda mais graves, no entanto, as medições não foram possíveis devido a sobreposição de outras frequências das músicas.

APITOS DE NAVIOS

Medimos os apitos de 8 navios de carga ou de passageiros, sem nenhuma distinção da finalidade das embarcações. As medições das frequências estão apresentadas na Tabela 6 juntamente com a caracterização em som grave ou agudo conforme classificação proposta neste artigo.

Tabela 6 - Medições dos apitos de navios de carga e de passageiros

Navio	Frequência (Hz)	Caracterização do som
1	91,90	Grave
2	98,00	Grave
3	101,00	Grave
4	109,00	Grave
5	109,43	Grave
6	111,00	Grave
7	112,20	Grave
8	149,90	Grave

As frequências emitidas pelos navios são caracterizadas como grave (abaixo de 315 Hz). Na média, a frequência dos apitos dos navios se situa em 110 Hz.

INSETOS VOADORES

As medições das frequências dos sons dos mosquitos e das cigarras são dificultadas pelas inúmeras fontes sonoras simultâneas (carros, conversação, etc.) e pela rápida variação ao longo do tempo. Foi por isso que as medições foram feitas a partir de vídeos da internet.

MOSQUITOS

Na Tabela 7, apresentamos as medições das frequências dos sons de dois mosquitos com suas respectivas caracterizações, onde as duas primeiras medidas são do mesmo inseto em instantes diferentes.

Tabela 7 - Mosquito

Mosquito	Frequência (Hz)	Caracterização do som
1a[13]	747,46	Agudo
1b[13]	678,46	Agudo
2[14]	380,17	Agudo

As frequências emitidas pelos mosquitos são caracterizadas como agudas (acima de 315 Hz).

CIGARRA

A Tabela 8 apresenta os resultados das frequências emitidas pelas cigarras e suas caracterizações.

Tabela 8 - Cigarra

Cigarra	Frequência (Hz)	Caracterização do som
1[15]	1378,12	Agudo
2[16]	1917,39	Agudo

A frequência sonora emitida pelas cigarras é caracterizada como

[13] Fonte: Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=6O2OxlAyfkw>. Acesso em: 20 mai 2018.
[14] Fonte: Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=FDl3Egw6QYs>. Acesso em: 20 mai 2018.
[15] Fonte: Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=ZG1uQ0DIyJo>. Acesso em: 20 mai 2018.
[16] Fonte: Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=hJ8gqfT4qoU>. Acesso em: 20 mai 2018.

aguda, acima de 315 Hz. A frequência está bem acima dos sons emitidos pelas asas dos mosquitos.

ADAPTAÇÃO DO EXPERIMENTO PARA APRESENTAÇÃO DIDÁTICA

Os experimentos realizados neste trabalho podem ser adaptados para apresentação didática, no entanto, há algumas restrições.

Recomendamos que a validação do aplicativo seja feita uma única vez antes das atividades didáticas. A validação do aplicativo requer um ambiente relativamente silencioso, o que é dificultado diante de um público.

Outra restrição para a adaptação pública dos experimentos é o uso exclusivo de fontes virtuais. Tal restrição leva em conta as dificuldades de produção de sons tonais por fontes reais. Por exemplo, se durante a apresentação pública ninguém conseguir afinar a voz por um tempo superior a 3 segundos, a medição não será possível. As vozes faladas ficam limitadas à vídeos do YouTube[17]. Já a medição, como fonte reais, dos apitos de navios depende de localizações e condições muito específicas, portos com grande circulação. Estes apitos também podem ser substituídos por vídeos do YouTube[18]. Já as vozes cantadas, os sons dos insetos e os simuladores não precisam ser alterados porque eles são fontes virtuais.

O professor ou apresentador dos experimentos públicos não precisa ater-se aos links e simuladores usados neste trabalho. Na internet, há uma infinidade de vídeos com vozes faladas e cantadas, sons emitidos por vários tipos de seres vivos e veículos e simuladores de toda a ordem. O único cuidado do professor ou apresentador é a escolha de sons tonais gerados continuamente por mais de 3 segundos devido às restrições do medidor de frequências.

Guardadas as restrições citadas, a apresentação pode ser realizada no ensino formal ou informal. No ensino formal, a apresentação pode ser feita em sala de aula do ensino médio ou superior. No caso do ensino superior, a apresentação é essencial em cursos de Arquitetura e Urbanismo, Engenharia e

[17] Um exemplo de fonte virtual de voz falada está disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=N_Amt83hvhM&feature=youtu.be>. Acesso em: 20 mai 2018.

[18] Um exemplo de fonte virtual de apito de navio está disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=gEJ7A09C30c>. Acesso em 29 mai 2018.

Física. Em particular para os cursos de Arquitetura e Urbanismo e Engenharia Civil, essa atividade é interessante na introdução no conceito de frequência na disciplina de Conforto Ambiental Acústica. Esse conceito bem apreendido, facilita a aplicação dos demais conceitos de Acústica. Por exemplo, a absorção sonora depende da frequência, o que implica diretamente na escolha de materiais de revestimento com a finalidade de redução do tempo de reverberação. A análise da fonte sonora com posterior projeto para mitigação do ruído, bem como o estudo de melhoria de desempenho acústico de partições, requer o conceito de frequência. Nos cursos de Física, seja Licenciatura ou Bacharelado, a apresentação do conceito de frequência sonora deve ser inserida em disciplinas sobre Oscilações e Ondas.

Na educação informal, a apresentação com a medição das frequências pode ser realizada em eventos de divulgação científica ou em cursos de extensão. A mesma apresentação pode ser disponibilizada em vídeos na internet. Além disso, a atividade proposta pode ser feita em museus de ciência.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, mostramos que equipamentos simples e acessíveis, como um aplicativo para smartphone, podem ser usados para identificação, medição e caracterização de frequências sonoras de diversas fontes.

Os dois programas usados como geradores para a validação do aplicativo emitem sons cujas frequências medidas são muito próximas das frequências nominais. Logo, estes programas conferem confiabilidade ao aplicativo. A alta precisão de 0,7% do aplicativo surpreendeu os autores deste trabalho.

Um dos grandes obstáculos para a realização deste trabalho foi a falta de um padrão na associação entre frequência sonora e sensações de graves e agudos. Como já foi descrito antes, as classificações da arquitetura, fonoaudiologia e otorrinolaringologia para grave e agudo não são as mesmas. Uma crítica a essa falta de critério único merece um trabalho à parte.

Metodologias análogas a do presente trabalho poderiam serem usadas na caracterização das outras grandezas acústicas. Por exemplo, a sensação de intensidade pode ser comparada com medições de amplitude. Ou

ainda, o timbre pode ser equiparado com padrões ondulatórios de detectores de som. Outro exemplo é a associação do conforto acústico com medições de frequências e amplitudes sonoras que se propagam pelas paredes dos edifícios.

Enfim, este trabalho abre toda uma gama de possibilidades no ensino de Acústica, relacionando quantidade e qualidade, medida e sensação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 16313**, Acústica – Terminologia. Rio de Janeiro. 2014. 11p.

BISTAFA, Sylvio R. **Acústica aplicada ao controle do ruído,** 2ed.São Paulo: Edgard Blücher, 2011, 384 p.

BONJORNO, José R; BONJORNO, Regina. A.; BONJORNO, Valter; RAMOS, Clinton. **Física fundamental – Novo**, 2º. Grau, São Paulo: FTD. 1999.

BRASIL, Marinha do Brasil. **RIPEAM** - Regulamento Internacional Para Evitar Abalroamentos no Mar, 1972. Emenda 2013. Disponível em: <https://www.ccaimo.mar.mil.br/sites/default/files/documentos_reuniao/ripeam_colreg_consolidada_com_emd_dez2013.pdfr>. Acesso em: 20 mai 2018.

CARVALLO, Renata M. M.; KOGA, Maira C.; CARVALHO, Mirley de; ISHIDA, Ieda M. Limiares auditivos para altas freqüências em adultos sem queixa auditiva. **ACTA ORL/Técnicas em Otorrinolaringologia**, São Paulo, v. 25, n. 1, p.62-66, 2007. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Ieda_Ishida/publication/228527803_Limiares_auditivos_para_altas_frequencias_em_adultos_sem_queixa_auditiva/links/53d08b240cf25dc05cfe47f9.pdf>. Acesso em: 20 mai 2018.

CONSOLI, Rotraut A. G. B.; OLIVEIRA, Ricardo L. **Principais mosquitos de importância sanitária no Brasil.** Rio de Janeiro: Fiocruz. 1994. 228p. Disponível em: <https://static.scielo.org/scielobooks/th/pdf/consoli-9788575412909.pdf>. Acesso em: 20 mai 2018.

COSTA, E. M. F. **Voz humana***:* classificação. 2016. Disponível em: <http://www.concertino.com.br/index.php?option=com_content&view=article&id=4933:a-voz-humana-classificacao>. Acesso em: 14 jan. 2018.

DRIVER, Rosalind; SQUIRES, Ann; RUSHWORTH, Peter; ROBINSON, Valerie. W. **Making Sense of Secondary Science**: Research into children's ideas*.* London: Routledge, 1994.

FINK, Regina. **Ensinando música ao aluno surdo:** perspectivas para a ação pedagógica inclusiva. 2009. 235f. Tese (Doutorado em Educação), Faculdade de Educação da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2009.

HALLIDAY, D; RESNICK, R. **Física.** v.2, 4ed. Rio de Janeiro: LTC-Livros Técnicos e Científicos Ed. Ltda. 1991. 309p.

HECHT, Eugene. **ÓPTICA** *Lisboa:* Calouste Gulbenkian, 1991. 720p.

HENRIQUE, Luís L. **Acústica Musical.** 4ed. Lisboa: Calouste Gulbenkian, 2011.1130p.

Le HUCHE, F.; ALLALI, A. **A voz**: anatomia e fisiologia dos órgãos da voz e da fala. v.1, 2ed., Porto Alegre: Artes Médicas Sul Ltda., 1999. 274p.

MACCAGNAN, Douglas H. B. Cigarra (Hemiptera: Cicadidae): emergência, comportamento acústico e desenvolvimento de armadilha sonora**. 2008. 90f. Tese (Doutorado em Ciências).** Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto da USP. Ribeirão Preto. 2008**.**

MAGGI, L. E. **Apostila da disciplina de Biofísica.** Rio Branco: UFAC, sd.

MEHTA, Madan; JOHNSON, Jim; ROCAFORT, Jorge. **Architectural Acoustics:** Principles and Design. London: Prentice Hall,1999. 446p.

MIZUKAMI, Maria da Graça N. Ensino: as Abordagens do Processo. São Paulo: EPU, 1986. 119p.

NETO, Maria de Fatima F. **Nível de conforto acústico: uma proposta para edifícios residenciais.** 2009. 257f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2009.

NUSSENZVEIG, H. Moysés., **Curso de Física Básica:** Fluidos, Oscilações e Ondas de Calor*.* v.2, 5ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2014. 314p.

OKUNO, Emico; CALDAS, Iberê L.; CHOW, Cecil. **Física para ciências biológicas e biomédicas**. São Paulo: Harbra Ltda. 1986. 490p.

RAMOS, Bruno Thadeu R. **As seis canções trovadorescas de Fructuoso Vianna***:* Aspectos intertextuais e perspectivas interpretativas para voz de contratenor na canção de câmara brasileira. 2013. 35f. Dissertação (Mestrado em Música), Escola de Música da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2013.

RUSSO, Ieda C.P.; PEREIRA, Liliane. D.; CARVALLO, Renata M. M.; ANASTÁSIO, Adriana R. T. Encaminhamentos sobre a classificação do grau de perda auditiva em nossa realidade. **Rev. soc. bras. fonoaudiol.** São Paulo, v.14, n. 2, 2009. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1516-80342009000200023&script=sci_arttext>. Acesso em: 20 mai 2018.

SOUZA, Léa C. L.; ALMEIDA, Manuela G; BRAGANÇA, Luís. **Bê-ábá da acústica arquitetônica: ouvindo a arquitetura.** São Carlos: EDFUSCAR, 2009. 150p.

TEIXEIRA, João A. M.*,* Voz Humana. **Revista eletrônica de Educação & Saúde**,16 de agosto de 2014. Disponível em: <http://excite-friburgo.blogspot.com.br/ 2009/05/voz-humana.html>. Acesso em: 14 jan. 2018.

TELLES, Dirceu D.; NETTO, João M. (org.). **Física com aplicação tecnológica:** oscilações, ondas, fluidos e termodinâmica. v. 2. São Paulo: Edgard Blücher, 2013. 352p.

VASCONCELOS, Yuri. Por que esses insetos fazem aquele barulho insuportável. **Revista Mundo Estranho**. 2011. Disponível em: <http://mundoestranho.abril.com.br/materia/por-que-esses-insetos-fazem-aquele-barulho-insuportavel>. Acesso em: 20 mai 2018.

SOBRE OS AUTORES:

MARIA DE FATIMA FERREIRA NETO
Física, Dr.ª Engenharia Civil
Docente na Universidade Paulista
Responsável técnica na Apoio Acústico ltda.
e-mail: fatimafneto@hotmail.com

LEONARDO SIOUFI FAGUNDES DOS SANTOS
Físico, Dr. Física
Professor Adjunto III de Física da UNIFESP, campus Diadema
Criador do Blog Quente e Calculista
www.quentecalculista.blogspot.com
Coordenador do Portal Píon da Sociedade Brasileira de Física
http://www.sbfisica.org.br/v1/novopion/
e-mail: leosioufi@gmail.com