

USO DE DOIS CELULARES PARA A DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DO SOM NO AR EM UM CANO DE PVC

Use of Two Mobile Phones for the Determination of the Speed of Sound in Air in a PVC Pipe

Caroline Vanessa Bauman Bertti [bauman.bertti@gmail.com]

Alexsandro Neves Silveira [silveira.a.n@gmail.com]

João Francisco Prolo Filho [joaoprolo@furg.br]

Águeda Maria Turatti [amturatti@furg.br]

Everaldo Arashiro [earashiro@furg.br]

Universidade Federal do Rio Grande

Av. Itália, km 8, bairro Carreiros, Rio Grande, RS, Brasil, 96203-900

Recebido em: 26/08/2023

Aceito em: 28/11/2023

Resumo

Neste artigo, descreve-se uma forma experimental de determinar a velocidade do som no ar em sala de aula. A proposta foi aplicada na disciplina de Física em uma turma do 2º ano do Ensino Médio na cidade de Rio Grande - RS. O experimento é de baixo custo e utiliza um cano de PVC, um par de fones de ouvido e dois celulares. O cano de PVC é usado como um tubo sonoro em duas configurações: aberto em ambas as extremidades e com uma das extremidades fechada. Quanto aos celulares, um é usado para gerar a frequência sonora emitida pelo fone de ouvido, enquanto o outro serve para medir a intensidade sonora na saída do cano de PVC. O princípio da ressonância é utilizado para identificar os valores de frequência que provocam o máximo de intensidade sonora. Os resultados obtidos experimentalmente mostram que os valores encontrados para a velocidade do som no ar aproximam-se dos valores encontrados na literatura, demonstrando a utilidade do experimento em aulas de Física.

Palavras-chave: Velocidade do Som; Celular; Experimento; Ensino de Física.

Abstract

In this article, an experimental method for determining the speed of sound in the air in a classroom setting is described. The proposal was applied in a Physics class for a 2nd-year high school students in the city of Rio Grande - RS. The experiment is low-cost and uses a PVC pipe, a pair of headphones, and two cell phones. The PVC pipe is used as a sound tube in two configurations: open at both ends and closed at one end. As for mobile phones, one is used to generate the sound frequency emitted through the headphones, while the other serves to measure the sound intensity at the exit of the PVC pipe. The principle of resonance is employed to identify the frequency values that produce the maximum sound intensity. The experimentally obtained results show that the values found for the speed of sound in the air are close to those found in the literature, demonstrating the usefulness of the experiment in Physics classes.

Keywords: Speed of Sound; Mobile Phone; Experiment; Physics teaching.

1. Introdução

O ensino puramente teórico de física aumenta consideravelmente o nível de abstração, o que, aliado ao estigma persistente de ser uma matéria difícil, resulta em obstáculos no processo de aprendizagem dos estudantes. Esse cenário é frequentemente causado por limitações nas atividades práticas em sala de aula, devido à falta de tempo, recursos ou restrições orçamentárias (Borges, 2002), especialmente na disponibilidade de equipamentos para coleta de dados quantitativos. No entanto, essas aulas práticas são fundamentais para a consolidação dos conceitos teóricos e do entendimento do campo conceitual (Moreira, 2002).

Ao mesmo tempo, o celular tem se tornado cada vez mais presente em diversos aspectos da vida do indivíduo, aumentando sua relevância ao longo dos anos. Entre os dispositivos disponíveis, nenhum realiza uma interação social tão ampla quanto o celular, especialmente entre os jovens (Rocha *et al.*, 2015), o que o torna um valioso aliado pedagógico. Além disso, a Base Nacional Comum Curricular (BNCC) (Brasil, 2018) inclui o uso de tecnologias na educação, considerando a imersão digital da sociedade.

O celular, seja pela sua disseminação, pela quantidade de sensores integrados na sua estrutura ou pela diversidade de aplicativos, tem sido usado no desenvolvimento de experimentos, tem trazido novos conceitos no processo de aprendizagem e vem favorecendo a adaptação em relação à captação de dados experimentais, sem perda da qualidade ou de informações durante o procedimento (Luh Sukariasih *et al.*, 2019). Muitos trabalhos propõem a utilização do celular em diferentes experimentos de física (Bauman Bertti *et al.*, 2022; Bauman Bertti *et al.*, 2023; Kuhn & Vogt, 2022; Pedroso *et al.*, 2020; Perotoni; Gaspar & Brito, 2023; Szigety *et al.*, 2020).

Devido a importância da experimentação para a compreensão dos conceitos físicos, considerando-se as limitações dos laboratórios escolares e a facilidade de acesso a celulares, é proposto neste artigo uma forma simples, mas com boa precisão e acurácia, a determinação da velocidade do som no ar usando um cano de PVC, um par de fones de ouvido e dois celulares. Nos celulares são usados o alto-falante e o microfone, funções comuns nestes equipamentos, independente da sua faixa de preço, o que torna o experimento acessível a diferentes grupos, quando comparados aos sistemas tradicionais de captação de dados.

2. Fundamentação teórica

Aparelhos celulares estão disseminados na sociedade brasileira e estimativas apontam que o número de celulares inteligentes é 20% maior do que o total da população (Souza, 2023). E com a crescente velocidade de acesso às informações e a facilidade que os aplicativos trazem para as pessoas, essas tecnologias também estão adentrando as instituições de ensino.

No entanto, as escolas muitas vezes não acompanham o desenvolvimento social, ficando desatualizadas em relação às tecnologias popularizadas e utilizadas pela própria comunidade. E existem diversos movimentos das escolas e políticos com a finalidade de proibir o uso de celulares em sala de aula (Lopes & Pimenta, 2020; Medeiros; Filho & Matos, 2019; Ribas; da Silva & Galvão, 2017). Mas banir o uso desses aparelhos em sala de aula é uma tarefa complicada, fazendo com que a melhor opção seja inseri-los no ambiente escolar como prática educacional e, uma das alternativas, é usá-los na tentativa de contornar a precariedade estrutural de muitas instituições de ensino no que se refere a experimentação.

A experimentação na Física tem como objetivo implementar ações que melhorem o interesse dos estudantes pela disciplina, podendo auxiliar também na tomada de decisões, porque aprimora a observação, a paciência e a curiosidade, além de ser uma ferramenta fundamental na consolidação

dos conceitos vistos na parte teórica. Os experimentos são potencializadores para uma aprendizagem significativa, uma vez que podem ser relacionados com o cotidiano (Moura & Neto, 2011; Andrade *et al.*, 2020) e, agregado ao celular, esse potencial é ainda maior (Wisman & Forinash, 2008).

Desta forma, este trabalho visa tornar o ensino de ondas estacionárias mais atrativo, usando celulares como ferramenta pedagógica. Tornando esses aparelhos instrumentos de experimentação na determinação da velocidade do som no ar através do fenômeno de ressonância não só auxiliaria no processo de ensino-aprendizagem, mas também possibilitaria ao estudante a interação com o equipamento, e uns com os outros.

O ar no interior de um tubo pode produzir vibrações, e ondas longitudinais estacionárias poderão ser criadas, cujas frequências são múltiplas de uma frequência fundamental, e são limitadas pelo comprimento do tubo. O cálculo dessas frequências torna-se simples para tubos de forma cilíndrica de comprimento L , abertos em ambas as extremidades ou com uma das extremidades fechada (Serway & Jewett, 2011).

Quando se tem um tubo fechado em uma das extremidades, a extremidade fechada é um nodo (N) de deslocamento, porque a barreira rígida nesta não permite movimento longitudinal do ar. A extremidade aberta de uma coluna de ar é quase um antinodo (A) de deslocamento. Com as condições limite de nodos ou antinodos nas extremidades da coluna de ar, estabelecem-se um conjunto de modos normais de oscilação. Então, a coluna de ar tem frequências quantizadas.

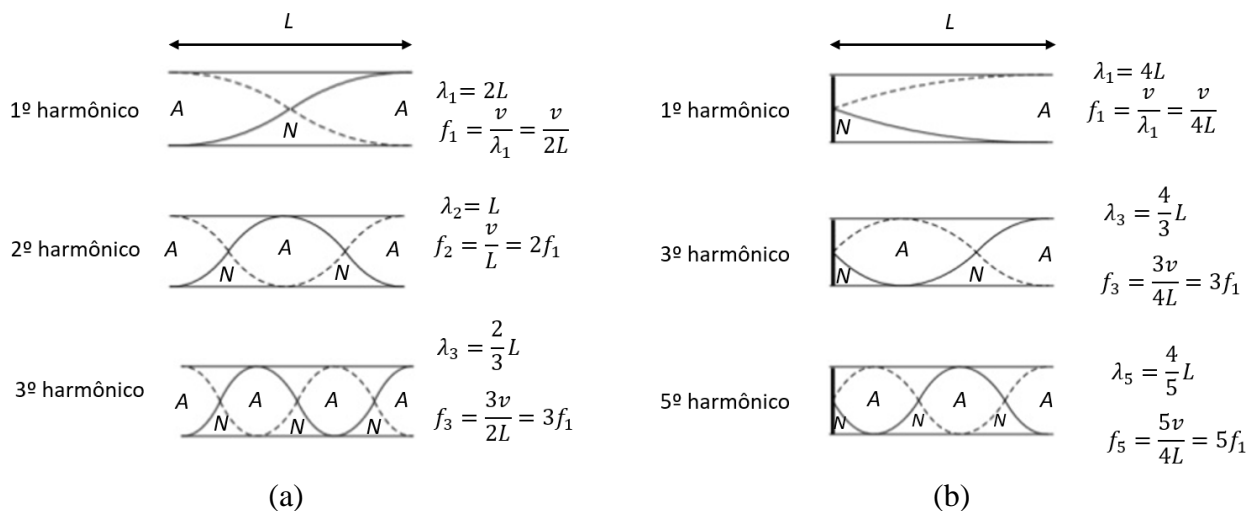


Figura 1 - As representações gráficas mostram o movimento dos elementos de ar em ondas estacionárias longitudinais em (a) um tubo aberto nas duas extremidades e em (b) um tubo fechado em uma das extremidades. **Fonte:** Autores.

As ondas estacionárias longitudinais são desenhadas como ondas transversais na Figura 1. Como elas estão na mesma direção que a propagação, é difícil desenhar deslocamentos longitudinais. Portanto, é melhor interpretar as curvas da Figura 1 como uma representação gráfica das ondas, com o eixo vertical representando o deslocamento horizontal $s(x,t)$ dos elementos do meio.

Os primeiros três modos normais de oscilação de um tubo aberto nas duas extremidades são mostrados na Figura 1a., cujos valores específicos de frequência são os capazes de gerar ressonância. Note que as duas extremidades são antinodos (A) de deslocamento (aproximadamente). No primeiro modo normal, a onda estacionária se estende entre dois antinodos adjacentes, uma distância de meio comprimento de onda. Portanto, o comprimento de onda é duas vezes o comprimento do tubo, e a frequência fundamental é $f_1 = v/2L$. Como a Figura 1a mostra, as frequências dos harmônicos subsequentes são $2f_1, 3f_1 \dots$

Ainda, em um tubo aberto nas duas extremidades, as frequências naturais de oscilação formam uma série harmônica composta por todos os múltiplos inteiros da frequência fundamental, expressos por

$$f_n = n \frac{v}{2L} \quad n = 1, 2, 3 \dots \quad (1)$$

Se um tubo é fechado em apenas uma das extremidades, a extremidade que é fechada é um nodo (N) de deslocamento (Figura 1b). Nesse caso, a onda estacionária para o modo fundamental se estende de um antinodo ao nodo adjacente, correspondendo a um quarto de comprimento de onda. Portanto, o comprimento de onda para o primeiro modo normal é $4L$, e a frequência fundamental é $f_1 = v/4L$. Como a Figura 1b mostra, as ondas de maior frequência que satisfazem as condições são aquelas que têm um nodo na extremidade fechada e um antinodo na aberta. Dessa forma, os harmônicos mais altos têm frequências $3f_1, 5f_1 \dots$, e podem ser expressos matematicamente como:

$$f_n = n \frac{v}{4L} \quad n = 1, 3, 5 \dots \quad (2)$$

Mas deve-se ressaltar que experimentalmente o diâmetro do tubo tem influência no som emitido por ele (Levine & Schwinger, 1948). Segundo Hirth, Kuhn & Müller (2015), o antinodo de deslocamento localiza-se em um local fora do tubo, a uma distância de $0,61 R$, em que R é o raio da seção transversal do tubo, da extremidade do tubo.

Assim, a frequência fundamental fornecida por um tubo fechado em uma das extremidades, dada pela equação 2, com o fator de correção devido seu ao diâmetro finito será,

$$f_n = n \frac{v}{4(L + 0,61R)} \quad n = 1, 3, 5 \dots \quad (3)$$

E a frequência fundamental fornecida, pela equação 1, por um tubo com ambas as extremidades abertas, e, portanto, com o fator de correção em ambas as extremidades, passará a ser

$$f_n = n \frac{v}{2(L + 1,22R)} \quad n = 1, 2, 3 \dots \quad (4)$$

3. Métodos e Materiais

Existe uma variedade de montagens experimentais em laboratório de física que permitem a medição da velocidade do som no ar analisando a ressonância em tubos (Baraúna; Furtado & Perez, 2015; Barbata & Marzulli, 2000; Cavalcante & Tavolaro, 2003; Da Costa Saab; Cássaro & Brinatti, 2005; Krummenauer & Darroz, 2020; Silva *et al.*, 2003) e todas com bons resultados. Mas, às vezes, essas montagens necessitam do uso do laboratório ou demandam algum tempo para a sua montagem.

Neste trabalho é proposto uma montagem simples, portátil e que pode facilmente ser feita em sala de aula, replicada em projetos extraclasses de um grupo de estudantes ou até mesmo individualmente para a determinação da velocidade som no ar. Para isso, é utilizado um cano de PVC, dois celulares, fone de ouvido, termômetro e trena.

O termômetro é utilizado para medir a temperatura do ambiente, já que influi na velocidade do som no ar. E a trena serve para medir o diâmetro e o comprimento do cano de PVC.

Um dos celulares foi empregado para gerar frequências sonoras. O aplicativo utilizado foi o *Frequency Sound Generator* da Bialamusic (2020), por ser de simples manipulação para variar as frequências (Figura 2a). Nesse celular é conectado um fone de ouvido, cujo fone é repousado em uma das extremidades do cano de PVC (Figura 3).

Já o outro celular foi utilizado como decibelímetro para mapear as frequências de ressonância, aquela frequência de onda sonora emitida pelo fone de ouvido que é igual à frequência de um dos modos normais de vibração do ar no cano de PVC. Na ressonância o sistema passa a vibrar com amplitude progressivamente crescente, resultando em um aumento na intensidade do som produzido, que pode ser detectado pelo ouvido humano, mas de maneira mais precisa com o aplicativo de decibelímetro. O aplicativo empregado foi o *Arduino Science Journal* (2023) (Figura 2b), por apresentar um modo gráfico de fácil identificação dos aumentos da intensidade sonora.

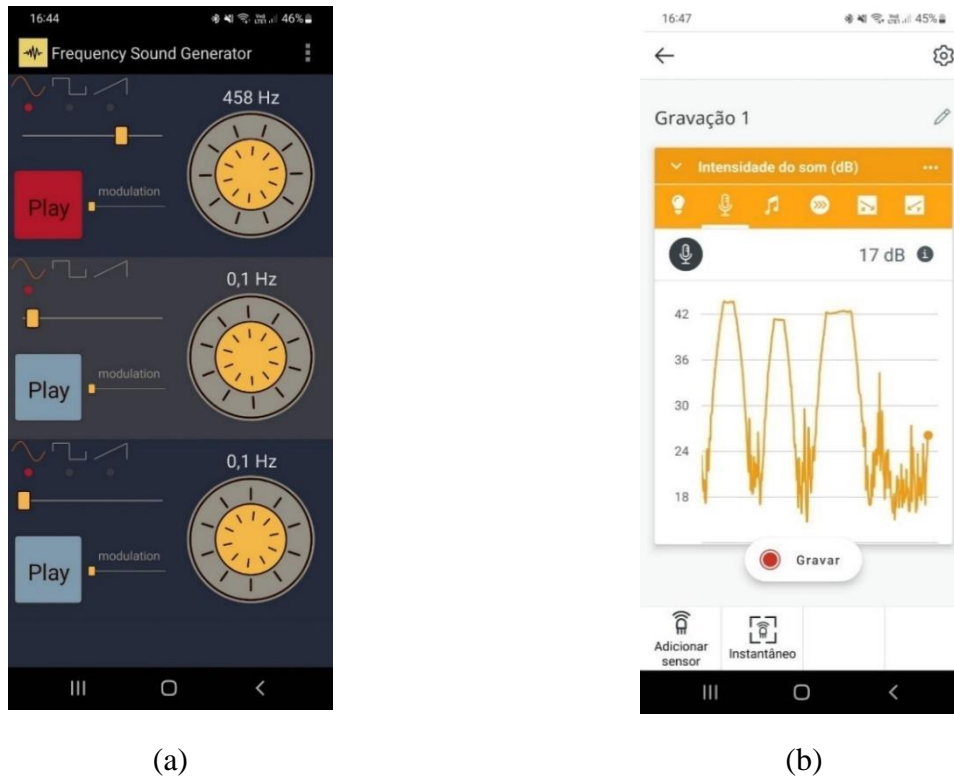


Figura 2 - Aplicativos utilizados para a prática experimental. (a) *Frequency Sound Generator* da Bialamusic para gerar ondas sonoras senoidais. (b) *Arduino Science Journal* na sua função de Intensidade Sonora.

O cano de PVC pode ser de tamanho e diâmetro diverso, assim como poderia ser substituído por qualquer objeto cilíndrico sólido e oco. Mas, caso tenha um comprimento maior do que 0,5 m, pode ser difícil de se obter o primeiro harmônico, já que a ressonância será de baixa frequência e a sua intensidade sonora pouco perceptível, dificultando o seu reconhecimento com o aplicativo de decibelímetro.

Na determinação da velocidade do som usando o tubo com uma das extremidades fechada é possível simplesmente colocar o cano de PVC em pé (Figura 3a), obstruindo assim uma de suas extremidades. Nessa configuração o fone de ouvido ligado ao celular com o gerador de frequências sonoras e o celular com o aplicativo de decibelímetro ficam na mesma extremidade aberta. Já no caso do cano com as extremidades abertas eles ficam em extremidades opostas (Figura 3b).

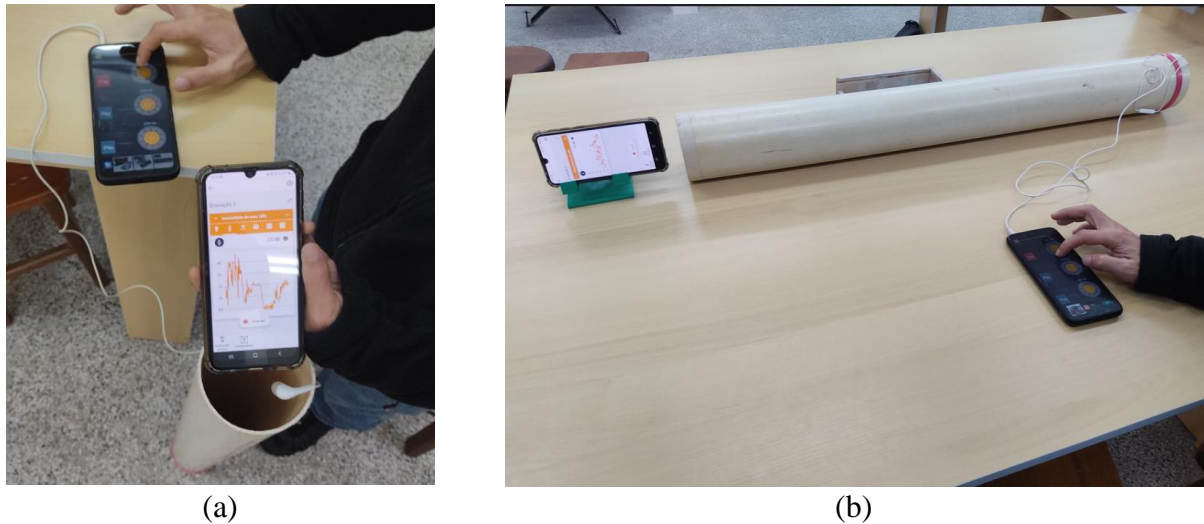


Figura 3 - Montagem experimental para (a) o cano com uma das extremidades fechada e com (b) as extremidades abertas. **Fonte:** Arquivo dos autores.

Para evitar a procura de maneira aleatória da frequência do primeiro harmônico ou do harmônico subsequente, é possível estimá-lo usando, dependendo da configuração do cano, a equação (3) ou (4), o comprimento L e o raio do cano R , e o valor aproximado da velocidade do som (340m/s). Obtida essa frequência aproximada, agora é possível encontrar com maior precisão a frequência de ressonância, apenas variando o seu valor com o aplicativo de gerador de frequências de uma onda senoidal e verificando no celular com o aplicativo de decibelímetro quando ocorre a ressonância, ou seja, em qual frequência ocorre um pico de intensidade sonora. Esse valor será o da frequência do primeiro harmônico ($n = 1$). As demais frequências para os subsequentes harmônicos são obtidas variando-se as frequências e verificando através da intensidade sonora a ocorrência da ressonância.

Obtidas experimentalmente algumas das frequências de ressonância para os seus respectivos números de harmônico é possível fazer um gráfico de frequência em função do número de harmônico. A regressão linear desse gráfico, obtida pelo Método dos Mínimos Quadrados (Vuolo, 1996), é uma reta que atravessa os seus pontos (frequência de ressonância para o seu respectivo número de harmônico) cuja inclinação, ou coeficiente angular, $\tan\phi$, fornece o valor para o cano fechado em uma das extremidades,

$$\tan\phi = \frac{v}{4(L + 0,61R)} \quad (5)$$

e, para o cano com ambas as extremidades abertas,

$$\tan\phi = \frac{v}{2(L + 1,22R)}. \quad (6)$$

Assim, conhecendo-se o valor do coeficiente angular $\tan\phi$, o comprimento L do cano e o seu diâmetro e, portanto, do seu raio R , é possível determinar o valor da velocidade do som no ar fazendo-se para o cano fechado em uma das extremidades,

$$v = 4(L + 0,61R)\tan\phi \quad (7)$$

e, para o cano com ambas as extremidades abertas,

$$v = 2(L + 1,22R)\tan\phi. \quad (8)$$

Todavia, no caso de limitação de tempo para se fazer algumas determinações de frequência de ressonância para diferentes números de harmônicos e posterior construção dos gráficos, é possível se obter o valor da velocidade do som no ar para uma frequência de ressonância para um harmônico

específico. Para isso basta isolar o termo v da equação (3) ou (4), dependendo da configuração do cano, ficando para o caso com uma das extremidades fechada

$$v = \frac{4(L + 0,61R)f_n}{n} \quad n = 1, 3, 5 \dots \quad (9)$$

e para o cano com ambas as extremidades abertas,

$$v = \frac{2(L + 1,22R)f_n}{n}. \quad n = 1, 2, 3 \dots \quad (10)$$

4. Resultados e discussões

A atividade foi aplicada em uma turma do segundo ano do Ensino Médio do Colégio Sagrado Coração de Jesus, Rio Grande - RS, Brasil (Silveira, 2021). Com uma semana de antecedência foi realizada uma aula para apresentar os conceitos de ondas estacionárias em colunas de ar e foi explicado aos estudantes a proposta da experimentação. Eles se mostraram motivados em poderem utilizar os seus celulares para a execução da atividade e curiosos o suficiente para muitos instalarem antecipadamente os aplicativos e por conta própria explorarem as suas funções, conforme relatos de alguns estudantes.

No dia da realização do experimento, que foi em sala de aula, os estudantes estavam empolgados. Eles se organizaram e começaram pela medição da temperatura do ar na sala de aula com o termômetro, que era de $17,5^\circ\text{C}$, e medições do comprimento e do diâmetro interno do cano de PVC com a trena. O cano foi reaproveitado de uma reforma da escola, cujas medidas de comprimento e diâmetro eram, respectivamente, $(0,9000 \pm 0,0005)$ m e $(0,0950 \pm 0,0005)$ m.

Primeiramente fizeram o experimento em que o cano tinha uma das extremidades fechada, de acordo com o procedimento descrito na seção anterior. Logo perceberam que para conseguirem fazer uma boa tomada de dados com o decibelímetro era necessário fazerem silêncio. E o que poderia ser inconveniente se mostrou como um aspecto de união da turma, já que todos se esforçaram para não fazerem barulho durante as medições. Os valores obtidos de frequência de ressonância com os seus respectivos harmônicos estão apresentados na Tabela 1. Em seguida fizeram o experimento com o tubo com ambas as extremidades abertas, cujos resultados também estão apresentados na Tabela 1.

O primeiro harmônico em ambas as configurações do tubo foi de difícil obtenção pelo fato do cano de PVC utilizado ser comprido ($L = 0,9000$ m), fazendo com que a sua frequência de ressonância correspondente fosse baixa e a intensidade sonora fraca dificultando o mapeamento com o aplicativo de decibelímetro. Por essa razão, seus valores não estão presentes na Tabela 1. Os demais harmônicos foram obtidos sem dificuldades pelos estudantes.

Tabela 1 - Valores experimentais da frequência de ressonância para os seus respectivos números de harmônicos para ambas as configurações do cano de PVC.

Cano de PVC com ambas as extremidades abertas		Cano de PVC com uma das extremidades fechada	
n	f (Hz)	n	f (Hz)
2	363	3	280
3	547	5	462
4	750	7	662
5	898	9	842
6	1074	11	1015
7	1260	13	1215
8	1445	15	1380

A partir dos dados da Tabela 1 foi confeccionado um gráfico de frequência de ressonância em função do seu respectivo número de harmônico (Figura 4).

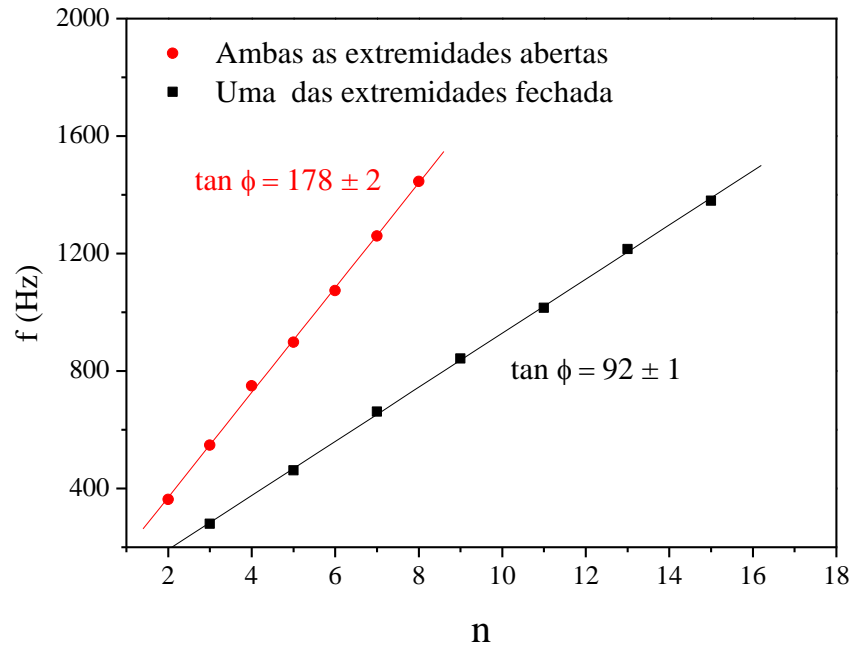


Figura 4 - Gráfico da frequência de ressonância em função do número de harmônico obtida experimentalmente pelos estudantes para o cano de PVC para as duas configurações testadas, com os respectivos coeficientes angulares obtidos pela regressão linear.

O coeficiente angular, obtido por meio da regressão linear dos pontos do gráfico (Figura 4), resultou em $(92 \pm 1) \text{ s}^{-1}$ para o cano com uma das extremidades fechada e $(178 \pm 2) \text{ s}^{-1}$ para o cano com ambas as extremidades abertas. Sabendo-se o comprimento do cano $L = (0,9000 \pm 0,0005) \text{ m}$ e o seu raio $R = (0,0475 \pm 0,0002) \text{ m}$ e utilizando a equação (7) ou (8), conforme a configuração do cano, foi obtido a velocidade do som no ar. Para o cano com uma das extremidades fechada,

$$v = (342 \pm 4) \text{ m/s}$$

e para o cano com ambas as extremidades abertas,

$$v = (341 \pm 4) \text{ m/s}.$$

A Figura 4 foi feita com *software* livre SciDAVis (2022), mas durante a aula os estudantes utilizaram o aplicativo Planilhas Google (2023) em seus celulares para fazerem os gráficos e obterem os coeficientes angulares. Alternativamente poderiam determinar o coeficiente angular, com menor precisão, usando o recurso de linearização (Monsanto, 2017) fazendo um gráfico manualmente em um papel milimetrado. Ou ainda, obter o valor da velocidade do som diretamente da equação (9) ou (10), dependendo da configuração do cano, para cada frequência de ressonância e o seu número de harmônico.

Sabe-se que a velocidade do som aumenta em função da temperatura do meio no qual a onda se propaga. Assim, para a determinação do erro percentual das medidas, foi necessário comparar o resultado da velocidade do som no ar obtido experimentalmente com o valor de referência para a

mesma temperatura em que foi realizado o experimento. Para o ar, a velocidade do som (v_t), em m/s, é dada pela equação a seguir (Saraiva & Pinto, 2015),

$$v_t = 331,4 + 0,6\theta$$

onde θ representa o valor da temperatura em graus Celsius e o valor 331,4 m/s da equação, corresponde à velocidade do som no ar a 0°C. Como a temperatura da sala no dia do experimento era de 17,5°C, a velocidade teórica v_t seria

$$v_t = 331,4 + 0,6(17,5) = 341,9 \text{ m/s.}$$

Assim, o erro relativo percentual da velocidade do som obtido para o cano de PVC aberto em ambas as extremidades ou fechada em uma das extremidades foi menor do que 1%. Muitos já sabiam o valor aproximado da velocidade do som no ar por já terem feito exercícios de Física, mas ficaram surpresos com a proximidade dos valores obtidos com os valores teóricos, pela simplicidade da experimentação.

Alguns dos participantes comentaram que não tinham ideia de que a temperatura ambiente poderia mudar a velocidade do som no ar, e até sugeriram repetir o experimento em um dia mais quente para verificar o aumento da velocidade do som. Durante as discussões finais, um estudante chegou à conclusão que os instrumentos de sopro poderiam desafinar quando a temperatura do ar estivesse muito acima ou abaixo da temperatura ambiente. Outro estudante, em uma pesquisa rápida pelo celular, encontrou um texto (Fuks, 2004) que corrobora com a teoria, dizendo que o som dos instrumentos de sopro ficaria mais agudos quando o ar estivesse mais quente e mais graves quando o ar estivesse mais frio.

5. Conclusão

Através dos resultados apresentados, mostra-se que é possível medir a velocidade do som de forma precisa e acessível utilizando um método simples e com portabilidade, que emprega um cano de PVC, fone de ouvido, e dois celulares. O experimento abrange conceitos como ressonância, ondas estacionárias e série harmônica.

Os resultados experimentais obtidos pelos estudantes se aproximaram com boa precisão daqueles previstos teoricamente para a velocidade do som no ar à temperatura em que a sala estava quando foi realizado o experimento. A diferença encontrada foi inferior a 1%, destacando a boa concordância entre o valor esperado e o valor experimentalmente obtido.

A incorporação de celulares como geradores de frequências e dispositivos de coleta de dados simplificou o processo de determinação da velocidade do som, tornando-o acessível para reprodução em sala de aula sem grandes restrições e sem a necessidade de um laboratório de Física. Adicionalmente, o uso do celular como aliado nas aulas proporcionou um interesse maior dos estudantes.

O comprometimento dos estudantes na realização da atividade merece destaque. Durante o experimento, foi essencial manter o silêncio para uma captação de dados mais precisa, e todos colaboraram, inclusive cobrando uns aos outros para que não fizessem ruídos. Embora os estudantes já tivessem conhecimento aproximado da velocidade do som através da resolução de exercícios, a prática descrita neste trabalho permitiu que compreendessem, por meio da experimentação, como determinar o seu valor e compará-lo com os valores encontrados na literatura.

6. Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS).

7. Referências

- Andrade, G. L., Pessoa, J. B., Silva, F. M. da, & Belinato, W. (2020). Ensino de Física: o uso de experimentos de baixo custo como estratégia de ensino. *Brazilian Journal of Development*, 6(10), 81676–81685. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n10-554>.
- Arduino. *Arduino Science Journal* (2023), [Aplicativo de Celular]. Google Play. <https://play.google.com/store/apps/details?id=cc.arduino.sciencejournal>.
- Baraúna, F., Furtado, J., & Perez, S. (2015). Medindo a velocidade do som utilizando figuras de Lissajous. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 37(3), 3310.
- Barbeta, V. B., & Marzulli, C. R. (2000). Experimento didático para determinação da velocidade de propagação do som no ar, Assistido por Computador. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 22(4), 447. http://sbfisica.org.br/rbef/pdf/v22_447.pdf
- Brasil, Base Nacional Comum Curricular (BNCC). 2018.
- Bauman Bertti, C. V., Arashiro, E., das Neves Avelaneda, V., & Neves Silveira, A. (2022). Determinação da aceleração da gravidade em um experimento de lançamento horizontal usando o detector de som de um smartphone. *Revista do Professor de Física*, 6(2), 10–24. <https://doi.org/10.26512/rpf.v6i2.43178>
- Bauman Bertti, C. V., Neves Silveira, A., Guerra Dytz, A., & Arashiro, E. (2023). Proposta de um experimento para a compressão da meia-vida radioativa com o uso de poliedros físicos e virtuais. *Revista de Enseñanza de la Física*, 35(1), 109–118. <https://doi.org/10.55767/2451.6007.v35.n1.41394>
- Bialamusic. (2020). *Frequency Sound Generator* [Aplicativo de Celular]. Google Play. <https://play.google.com/store/apps/dev?id=5300832511418475109>
- Borges, A. T. (2002). Novos rumos para o laboratório escolar de ciências. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 19(3), 291-313. <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/6607/6099>
- Cavalcante, M. A., & Tavoraro, C. R. (2003). Medir a velocidade do som pode ser rápido e fácil. *Física na Escola*, 4(1), 29-30. <http://www1.fisica.org.br/fne/phocadownload/Vol04-Num1/a101.pdf>
- da Costa Saab, S., Cássaro, F. A. M., & Brinatti, A. M. (2005). Laboratório caseiro: tubo de ensaio adaptado como tubo de kundt para medir a velocidade do som no ar. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 22(1), 112-120. <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/6397/5923>
- Fuks, L. (2004). Aspectos acústicos, fisiológicos e perceptivos da execução e construção de instrumentos de sopro. *Anais do I Seminário Música Ciência Tecnologia: Acústica Musical*, 130-133. http://gsd.ime.usp.br/acmus/publi/textos/08_fuks.pdf

- Google LLC. Planilhas Google (2023), [Aplicativo de Celular]. Google Play. <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.google.android.apps.docs.editors.sheets>
- Hirth, M.; Kuhn, J. & Müller, A. (2015). Measurement of sound velocity made easy using harmonic resonant frequencies with everyday mobile technology. *The Physics Teacher*, 53(2), 120-121. <https://doi.org/10.1119/1.4905819>
- Krummenauer, W. L., & Darroz, L. M. (2020). Determinação experimental da velocidade do som no ar utilizando um osciloscópio virtual. *Interfaces Científicas-Exatas e Tecnológicas*, 4(1), 130-143. <https://doi.org/10.17564/2359-4942.2020v4n1p130-143>
- Kuhn, J., & Vogt, P. (Eds.). (2022). *Smartphones as mobile minilabs in Physics: Edited Volume Featuring More Than 70 Examples from 10 Years The Physics Teacher-column IPhysicsLabs*. Springer Nature.
- Levine, H. & Schwinger, J. (1948). On the radiation of sound from an unflanged circular pipe. *Physical Review*, 73(4), 383-406. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.73.383>
- Luh Sukariasih, E., Sahara, L., Hariroh, L., & Fayanto, S. (2019). Studies the use of smartphone sensor for physics learning. *International Journal of Scientific & Technology Research*, 8 (10), 862-870.
- Lopes, P. A., & Pimenta, C. C. C. (2020). O uso do celular em sala de aula como ferramenta pedagógica: Benefícios e desafios. *Revista Cadernos de Estudos e Pesquisa Na Educação Básica*, 11(01), 06-19. <https://doi.org/10.46761/unibalsas.v11i01.121>
- Medeiros, J. S. R. de, Filho, H. D. da F., & Matos, R. S. (2019). Uso de celular no ensino de ciências exatas: um estudo de caso. *Science and Knowledge in Focus*, 1(2), 37-47. <https://doi.org/10.18468/sc.knowl.focus.2018v1n2.p37-47>
- Moreira, M. A. (2002). A teoria dos campos conceituais de Vergnaud, o ensino de ciências e a pesquisa nesta área. *Investigações em ensino de ciências*. 7(1), 7-29.
- Moura, D. de A., & Neto, P. B. (2011). O ensino de acústica no ensino médio por meio de instrumentos musicais de baixo custo. *Física Na Escola*, 12(1), 12-15.
- Pedroso, L. S., Pinto, J. A., de Macêdo, J. A., & da Costa, G. A. (2020). Experimentos de baixo custo utilizando o aplicativo de física Phyphox. *Latin-American Journal of Physics Education*, 14(4), 4301-1-4301-11.
- Perotoni, M., Gaspar, R., & Brito, E. J. (2023). Magnetic field measurements using mobile phones: programming and experiments. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 45, e20220317. <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2022-0317>
- Ribas, A. S., da Silva, S. de C. R., & Galvão, J. R. (2017). *Telefone celular como recurso didático no ensino de Física*. In Editora UTFPR (Vol. 5, Issue 1). <http://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/1596/1/telefonecelular.pdf>
- Rocha, M. D. da, Evangelista, E. G., Machado, N. G., & Mello, G. J. (2015). (Des)Liga esse celular, moleque! Smartphone como mini laboratório no ensino de Ciências. *Revista Monografias Ambientais*, 14, 41-52. <https://doi.org/10.5902/2236130820435>
- Saraiva, C & Pinto, A. R. (2015). Determinação do valor da velocidade do som no ar. *Gazeta ao laboratório*, 38(2), 13-19.

- SciDAVis. Versão 2.9.2. Miquel Garriga, Arun Narayanankutty, Dmitriy Pozitron, Russell Standish, 2022.
- Serway, R. A. & Jewett Jr, J. W. (2011). *Física para cientistas e engenheiros, volume 2: oscilações, ondas e termodinâmica*. São Paulo: Cengage Learning.
- Silva, W. P. D., Silva, C. M., Ferreira, T. V., Rocha, J. S., Silva, D. D., & Silva, C. D. (2003). Velocidade do som no ar: um experimento caseiro com microcomputador e balde d'água. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 25, 74-80.
- Silveira, A. N. (2021). Sensoriamento de experimentos para o ensino de ondas usando Smartphone. [Dissertação de Mestrado]. Universidade Federal do Rio Grande, Programa de Mestrado Nacional em Ensino de Física.
- Souza, L. P. (2023). Brasil tem mais smartphones do que habitantes, aponta levantamento. Veja. <https://veja.abril.com.br/tecnologia/brasil-tem-mais-smartphones-do-que-habitantes-aponta-levantamento>
- Szigety, E. G., Bernal, L. J., Bilbao, L. E., & Pérez, G. H. (2020). Obtención de espectros usando un smartphone en la clase de Física. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 37(1), 263-282.
- Vuolo, J. H. (1996). Fundamentos da teoria de erros. 2a. ed. São Paulo: Edgard Blücher.
- Wisman, R. F.; Forinash, K. (2008) Science in your pocket. *International Journal on Handson Science*, 1(1), 1-9.