

Estudo do efeito

Doppler

utilizando *smartphones*:

determinando a

velocidade do som



Matheus L.G. Pereira[#]
Eduardo V. Bergmann
Gustavo M. Arcolesi
Vinicius S. Silva
Guilherme M. Santos

Departamento de Física, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, PR, Brasil.

RESUMO

Atualmente, a maioria dos alunos possui celulares. Esses aparelhos assumiram importante papel em nosso dia a dia em diversos ambientes, incluindo no ambiente profissional. Entretanto, nas escolas e universidades, o celular ainda não é bem utilizado em favor do aprendizado. Em virtude disso, propomos neste trabalho a utilização dos sensores de frequência sonora e de acelerômetros do celular como uma ferramenta de coleta de dados. O intuito disso é a visualização dos conceitos envolvendo o estudo do efeito Doppler por meio do pêndulo físico através de duas análises: uma qualitativa, que pode ser utilizada no Ensino Médio; e uma quantitativa, ideal para atividades laboratoriais do ensino superior, mas também adaptável para turmas do Ensino Médio. Devido à simplicidade do experimento, ele pode ser realizado tanto em sala de aula quanto na casa dos alunos, oferecendo, assim, uma ferramenta extra para atividades experimentais que não envolvam o ambiente escolar, tendo em vista a recente situação do ensino por conta da pandemia da COVID-19.

Palavras-chave: pêndulo físico; efeito Doppler; experimentos com *smartphones*



1. Introdução

Uma das tecnologias que mais geram impacto na sociedade são os *smartphones*. Diferentemente dos computadores e dos microcontroladores, os celulares enfrentam muita resistência por parte do corpo docente de qualquer instituição de ensino, como pontuam Lopes e Pimenta [1].

Os *smartphones* são uma ferramenta altamente distrativa, por isso são, muitas vezes, combatidos por meio de proibições dentro de sala de aula. Além da distração, muitos professores se encontram relutantes para o uso dessa tecnologia devido à insegurança frente ao novo. Vale ressaltar que essa tecnologia já está profundamente arraigada na cultura dos alunos e, por causa disso, facilita sua utilização como ferramenta pedagógica [2, 3].

Apesar das dificuldades encontradas na utilização dos celulares em sala de aula, eles podem ser vistos como um meio facilitador do aprendizado em razão de sua vasta aplicabilidade. Um exemplo disso é a utilização de seus sensores para coleta de dados [4, 5].

Neste trabalho, propomos um experimento envolvendo a utilização de um aplicativo de *smartphone* para a demonstração do efeito Doppler, do comportamento amortecido do pêndulo físico e também do cálculo da velocidade do som. Tal experimento pode ser realizado em matérias laboratoriais do ensino superior, todavia é possível aplicar a análise qualitativa no Ensino Médio e, a depender do engajamento da turma e do professor, obter a velocidade do som.

1.1. Coleta de dados por aplicativos

Os *smartphones* têm vários sensores que possibilitam a coleta de dados experimentais por meio de aplicativos. Entre eles, a proposta desse trabalho é a utilização do aplicativo *Arduino Science Journal* (ASJ). O ASJ coleta dados de múltiplos sensores simultaneamente e gera um gráfico interativo.

Para a realização do experimento supracitado, é necessário a aferição de duas grandezas físicas: aceleração e frequência sonora. A medida da frequência sonora é determinada através da gravação do som, durante um curto período de tempo, feito pelo microfone do celular. Com relação a outra grandeza, temos o sensor acelerômetro. No interior desse sensor, há pequenas massas suspensas que, em resposta a um movimento abrupto, se movem, possibilitando a aferição da aceleração a que o *smartphone* está sujeito [6]. Um exemplo de uso desse sensor pode ser visto na mudança de orientação da tela, pois essa alteração na inclinação do celular é facilmente detectável.

Embora o assunto do uso dos celulares no ensino gere polêmica, é possível encontrar um número significativo de trabalhos envolvendo-os [7-11]. A abundância marcante dessa tecnologia em sala de aula pode servir de base para a elaboração de atividades que minimizem o tempo destinado ao procedimento experimental e que, em contrapartida, aumentem o período de análise e discussões a respeito dos fenômenos observados.

Os *smartphones* podem ser vistos como um meio facilitador do aprendizado em razão de sua vasta aplicabilidade e disponibilidade em sala de aula

[#]Autor de correspondência. E-mail: matheuslucasgp@gmail.com.

1.2. Efeito Doppler

Quando um receptor e uma fonte sonora apresentam um movimento relativo entre si, a frequência detectada pelo receptor é diferente da emitida pela fonte. Esse fenômeno é conhecido como efeito Doppler. Se o movimento relativo é de aproximação, a frequência captada é maior do que a frequência do som emitido pela fonte. Caso contrário, se o movimento relativo é de afastamento, a frequência detectada é menor do que a frequência emitida pela fonte [12]. A descrição matemática do efeito Doppler é dada pela Eq. (1)

$$f_r = \frac{v_s \pm v_r}{v_s \pm v_f} f_f, \quad (1)$$

onde f_r é a frequência detectada pelo receptor, v_s a velocidade do som no ar, v_r a velocidade do receptor, v_f a velocidade da fonte e f_f a frequência emitida pela fonte.

Um exemplo da presença do efeito Doppler no cotidiano é a passagem de uma ambulância, com a sirene ligada, por um pedestre parado. É possível dividir a situação em dois momentos: inicialmente, quando a ambulância se aproxima do pedestre, a frequência sonora da sirene percebida por ele se torna maior, como mostra a Eq. (1). Sendo assim, o som é mais agudo. Posteriormente, quando a ambulância se afasta, é notório mediante a Eq. (1) que a frequência sonora da sirene diminui e, portanto, o pedestre ouve um som mais grave.

1.3. Oscilação do pêndulo físico

No experimento proposto, há um corpo rígido suspenso que oscila livremente em um único plano, como mostra a Fig. 1. Dessa maneira, podemos utilizar a teoria de pêndulos físicos para entender alguns comportamentos observados.

Para simplificar o cálculo, utilizare-

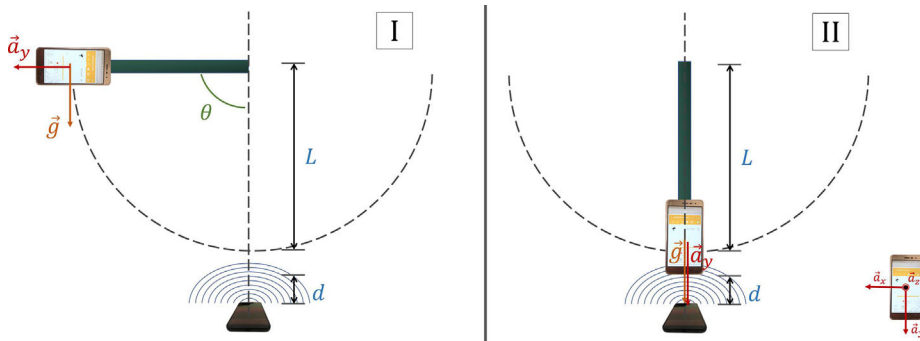


Figura 1 - I - Posição inicial do pêndulo logo antes de ser solto. II - Aproximação máxima do receptor com o emissor.

mos o caso II para fazer a estimativa da velocidade do som, pois, assim, a aceleração medida pelo aparelho no eixo y é numericamente igual à aceleração centrípeta

$$a_c = \frac{v_r^2}{r}, \quad (2)$$

onde a_c é a aceleração centrípeta, v_r a velocidade do receptor e r equivale ao raio. Na configuração experimental proposta na Figura 2, a fonte emissora está em repouso, ou seja, $v_f = 0$; para este caso, podemos ainda reescrever a equação do efeito Doppler (Eq. (1)) em termos da velocidade do som, obtendo-se

$$v_s = \left(\frac{f_r}{f_f} \pm 1 \right)^{-1} v_r. \quad (3)$$

Sabendo que serão selecionados somente os dados onde a frequência do receptor será maior que a frequência da fonte (caso de aproximação), utilizaremos o sinal de subtração da Eq. (3). Dessa forma, obtemos, ao substituir a Eq. (2) na Eq. (3), que

$$v_s = \left(\frac{f_r}{f_f} \pm 1 \right)^{-1} \sqrt{a_c r}. \quad (4)$$

Note ainda que se deve levar em consideração os efeitos como o atrito gerado pela rotação da cartolina com o eixo do pivô e a resistência do ar. Assim, nesse experimento é observada a oscilação de um pêndulo físico do tipo amortecido, cuja solução genérica para a posição em função do tempo é dada por

$$x(t) = A e^{-bt/2I_p} \cos(\omega t + \varphi), \quad (5)$$

onde b é a constante de amortecimento responsável pela diminuição da amplitude da oscilação com o tempo, A é a amplitude do sistema, I_p é o momento de inércia do corpo em relação ao eixo de rotação, φ é uma constante de fase

que é nula se o movimento teve seu início cronometrado ($t = 0$) na posição angular máxima (Fig. 1-I) e ω é a frequência angular [13].

2. Procedimento experimental

O experimento proposto consiste em um pêndulo físico composto do conjunto *smartphone*, receptor e cartolina. Além disso, há um *smartphone* emissor de frequências sonoras situado estaticamente abaixo do pêndulo. Os materiais necessários para a construção de tal conjunto estão listados a seguir.

- Tira de cartolina;
- Dois *smartphones*;
- Suporte fixo na parede;
- Fita adesiva.

Embora Laccio e cols. [9] já tenham apresentado uma montagem experimental semelhante, há algumas diferenças cruciais no arranjo proposto. A inversão da posição das fontes emissora e receptora viabiliza o cálculo da velocidade do som. Ademais, foram utilizados dois *smartphones*, tornando o experimento mais acessível, além de menos modificações.

O *smartphone* que realizou o movimento oscilatório gravou a frequência sonora e o componente y da aceleração (a_y) simultaneamente; esse celular foi denominado receptor. O *smartphone* posicionado logo abaixo do eixo do movimento do pêndulo permaneceu em repouso e foi denominado fonte. O receptor foi acoplado a uma cartolina que, por sua vez, foi perfurada por um objeto com ponta. Na Fig. 2, podemos visualizar a configuração experimental.

A escolha da cartolina foi feita devido à facilidade de ser encontrada e também ao seu baixo custo. Quanto mais distante do eixo o celular receptor estiver, maior será o efeito Doppler observado. Além disso, foi utilizado uma chave *Philips* como o objeto com ponta. Todavia, pode-se utilizar também outro objeto que permita à cartolina deslizar com facilidade, por exemplo, uma caneta.

O experimento consiste na fonte emitindo um sinal acústico com frequência fixa e o receptor detectando o sinal enquanto executa um movimento de oscilação amortecida. Comumente, os *smartphones* têm dificuldade em captar frequências superiores a 4 kHz. Em razão dessa limitação, recomenda-se que a frequência da fonte (f_f) seja de 3 kHz.

O receptor aferiu a frequência so-

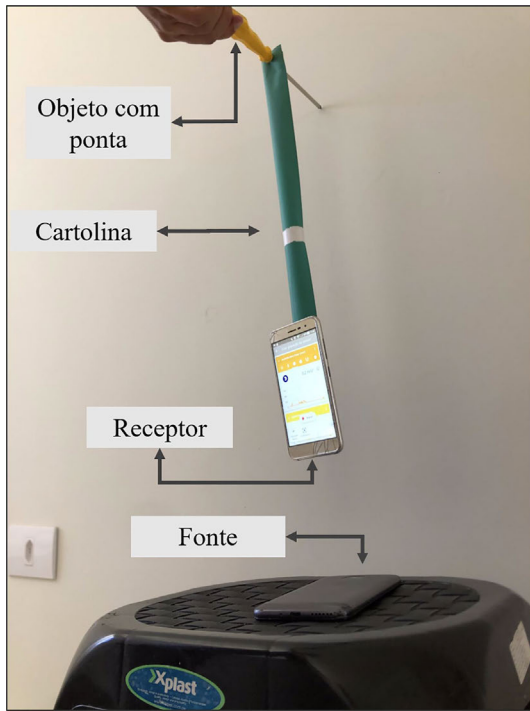


Figura 2 - Configuração experimental.

nora e a aceleração no eixo y por meio do aplicativo ASJ, Fig. 3, onde foi feita da seguinte forma: (I) selecionou-se o ícone “+”, criando um novo “experimento sem título”; (II) no mesmo local, selecionando o ícone novamente, pode-se inserir um texto, uma captura de sensor ou uma imagem; (III) para a aferição, precisamos selecionar “Sensores”; (IV) há uma aba na qual pode-se selecionar qualquer sensor disponível no *smartphone*. Como é necessária a aferição de dois sensores simultanea-

mente, é preciso selecionar “Adicionar Sensor”; (V) por fim, clique em “Gravar” quando o arranjo experimental estiver pronto. Na fonte emissora, foi utilizado o *website* Econmaster [14], que gera ondas sonoras de frequência fixa.

Com a opção de gravação de dados acionada, o celular receptor foi solto de uma altura arbitrária com um ângulo $\theta = 90^\circ$. A gravação foi finalizada quando o objeto parou de oscilar por conta do atrito entre a cartolina e o objeto com ponta. Dificilmente o movimento ultrapassa 2 min. Ademais, vale ressaltar a importância do silêncio no ambiente enquanto o experimento é realizado, pois o efeito Doppler produzido pode se tornar imperceptível caso haja ondas sonoras externas ao experimento, produzindo, assim, dados ruidosos.

3. Resultados esperados

3.1. Análise qualitativa

As Figs. 4a e 4b mostram uma gravação obtida do experimento. Nelas, podemos observar que a amplitude diminui devido ao movimento ser harmônico amortecido, isto é, os diversos atritos - como o ar e a cartolina - causam dissipações de energia, fazendo com que o pêndulo diminua cada vez mais sua ve-

locidade, ou seja, ele é desacelerado. Além disso, quando o movimento oscilatório termina, o receptor capta a aceleração gravitacional, resultando nos valores finais apresentados na Fig. 4a.

O receptor atinge a velocidade máxima quando está paralelo ao eixo y (Fig. 1-II). Nesse instante, a medida de a_y corresponde aos valores máximos obtidos (Fig. 4c e 4e).

Quando o receptor se aproxima do eixo y , ele capta uma maior quantidade de ondas, fazendo com que a frequência observada pelo sensor aumente (Fig. 4d). No momento em que o celular deixa de se aproximar e começa a se afastar, há uma alteração abrupta na frequência sonora (Fig. 4f). Esse fenômeno é descrito matematicamente pela Eq. (1).

Por fim, quando o *smartphone* atinge uma velocidade nula - correspondente ao caso I da Fig. 1 - sua aceleração em y diminui, uma vez que o componente a_y é mínimo. Como pode ser visto na Fig. 4g, quando a_y está com seu valor mínimo, a frequência aferida (Fig. 4h) é aproximadamente igual à frequência da fonte. Alternativamente, isso pode ser constatado pela Eq. (1) quando $v_r = 0$, $f_f = f_r$. A diferença entre o valor da frequência observada com a teórica se deve à sensibilidade do aparato.

3.2. Análise quantitativa

Para ir além da análise qualitativa do efeito Doppler, pode-se calcular, mediante os dados obtidos, a velocidade do som. Nesse caso, usa-se a Eq. (4) nos pontos onde a aceleração é máxima,



Figura 3 - Esquemática de como aferir as grandezas do experimento através do ASJ.

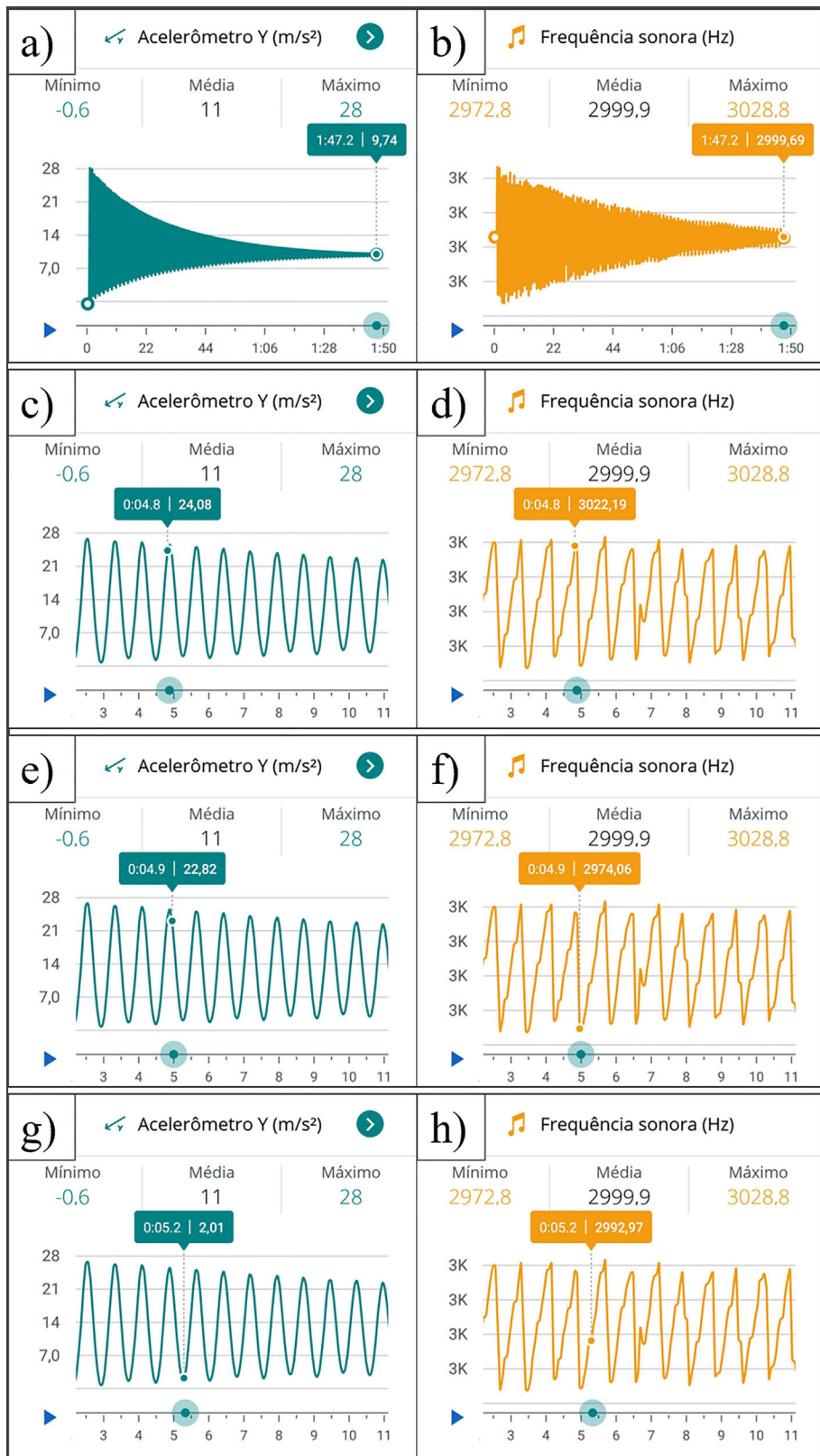


Figura 4 - Interface do aplicativo mostrando os dados obtidos do experimento. a) Aceleração no eixo y. b) Frequência sonora. c), e), g) Pontos da aceleração selecionados para análise. d), f), h) Pontos da frequência selecionados para análise.

pois é somente nesses máximos que ocorre $a_y = a_c$.

Como demonstrado na Fig. 5, foram selecionados os dez primeiros picos pa-

ra a análise. Determinou-se tais picos pois, no início do movimento pendular, a diferença da frequência entre o receptor e a fonte é maior, evidenciando o efeito Doppler. Para os picos posteriores, o amortecimento do movimento pendular faz com que tal efeito fique menos perceptível, dificultando, assim, uma análise quantitativa.

Tendo obtido os valores correspondentes da frequência máxima, pode-se utilizar a Eq. (4) para calcular os valores experimentais da velocidade do som associados aos respectivos picos. Assim, adquiriu-se o gráfico da velocidade do som experimental demonstrado na Fig. 6.

4. Proposta de aplicação em sala de aula

Movimentos ondulatórios sempre estão presentes em ementas dos primeiros anos do ensino superior. A proposta deste trabalho consiste em utilizar esse experimento como uma extensão do estudo laboratorial de pêndulos físicos, pois, além de obter todas as grandezas comuns como período, coeficiente de resistividade e velocidade angular, pode-se também averiguar o fenômeno do efeito Doppler e calcular a velocidade do som.

Em laboratório, pode-se deduzir através da configuração experimental a Eq. (4) e, a partir dos dados obtidos, confeccionar uma tabela com os resultados. O professor pode instigar o aluno a analisar os pontos máximos e a calcular a velocidade do som, assim como na Tabela 1. Em seguida, uma discussão acerca de erros experimentais será suficiente para que a turma compreenda que a variação dessas velocidades se deve ao fato de que sempre haverá erros experimentais associados a qualquer medida.

Para o Ensino Médio, há também na ementa o estudo de pêndulos e do efeito Doppler, portanto o experimento é justificável já que ele relaciona ambos os fenômenos. Normalmente, salas de Ensino Médio comportam uma grande quantidade de alunos; dessa forma, talvez seja mais produtivo que o professor apresente o experimento e a teoria de uma maneira expositiva e permita aos alunos que o façam em suas casas, individualmente ou em grupos, com o objetivo principal de identificar o efeito Doppler. Para finalizar o assunto, o professor pode calcular em sala a velocidade do som a partir dos dados obtidos pelos alunos.

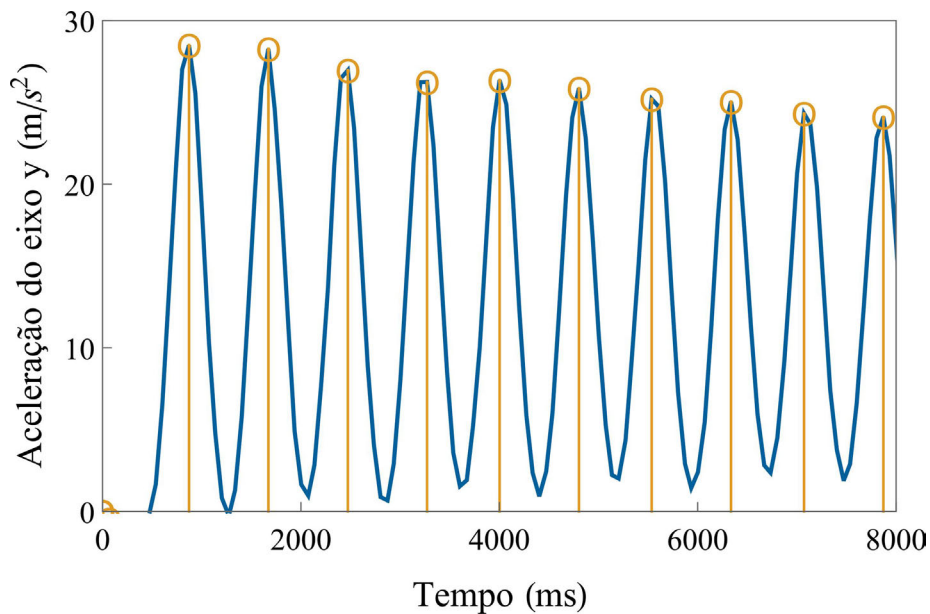


Figura 5 - Gráfico $a_y \times t$, onde foram selecionados os valores máximos da aceleração para o cálculo da velocidade do som.

Tabela 1: Dados experimentais utilizados para a confecção da Fig. 6.

| t (ms) | a_y (m/s^2) | f_r (Hz) | v_{som} (m/s) |
|--------------|-------------------|--------------------|-------------------|
| 803 ± 1 | $27,01 \pm 0,01$ | $3023,75 \pm 0,01$ | $347,38 \pm 0,16$ |
| 1603 ± 1 | $26,47 \pm 0,01$ | $3024,06 \pm 0,01$ | $359,61 \pm 0,17$ |
| 2403 ± 1 | $26,22 \pm 0,01$ | $3025,63 \pm 0,01$ | $339,45 \pm 0,15$ |
| 3203 ± 1 | $25,98 \pm 0,01$ | $3022,50 \pm 0,01$ | $317,15 \pm 0,14$ |
| 3936 ± 1 | $23,47 \pm 0,01$ | $3022,19 \pm 0,01$ | $346,58 \pm 0,17$ |
| 4736 ± 1 | $24,08 \pm 0,01$ | $3022,19 \pm 0,01$ | $351,05 \pm 0,17$ |
| 5471 ± 1 | $21,47 \pm 0,01$ | $3021,25 \pm 0,01$ | $346,14 \pm 0,18$ |
| 6272 ± 1 | $22,82 \pm 0,01$ | $3021,88 \pm 0,01$ | $360,98 \pm 0,19$ |
| 7002 ± 1 | $23,35 \pm 0,01$ | $3021,25 \pm 0,01$ | $360,69 \pm 0,20$ |
| 7803 ± 1 | $20,65 \pm 0,01$ | $3020,00 \pm 0,01$ | $346,59 \pm 0,18$ |

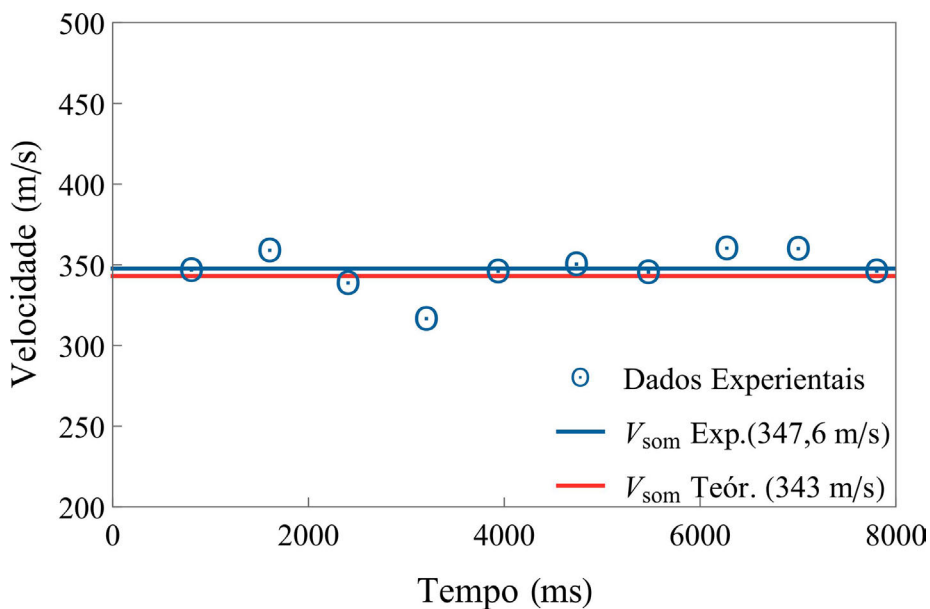


Figura 6 - Comparação da velocidade do som obtida experimentalmente. O ajuste linear dos valores experimentais está identificado pela linha azul. Em comparação, a linha vermelha mostra o valor da velocidade do som apresentado na literatura [15].

5. Conclusões

Para que os experimentos possam produzir um aprendizado significativo, é necessário dar mais foco na introdução do novo conceito com base no que os alunos já sabem [16]. Além disso, o foco em etapas que envolvam a análise de dados e, conseqüentemente, menos ênfase em exercícios repetitivos ou coletas de dados excessivamente longas, pode produzir mais interesse e facilitar o aprendizado por parte dos alunos [2, 17].

A utilização dos *smartphones* como ferramenta pedagógica pode gerar bons resultados, apesar do seu potencial distrativo. Quima [18] ressalta que, se levarmos em consideração o panorama atual das redes públicas de ensino, o uso experimental dos celulares melhora a dinâmica e a qualidade das aulas de física. Atualmente há vários aplicativos e *websites* que assumem uma proposta educacional, entre eles o ASJ, que é tanto um aplicativo quanto um *website* [19] reunindo um considerável acervo de experimentos portáteis com excelentes instruções para professores que não são tão familiarizados com essa tecnologia.

No caso dessa proposta, o tempo de execução é relativamente curto. Além disso, podemos instruir os alunos a realizar essa investigação tanto em sala de aula quanto em casa. Esse aspecto pode ser muito útil em panoramas que envolvam atividades remotas, como pôde ser visto recentemente durante a pandemia de COVID-19.

Assumindo um ponto de vista experiencial de aluno, percebe-se que há muita empolgação quando o professor adere a elementos comuns do cotidiano para a sala de aula. Verifica-se, assim, que há outras maneiras de ensinar física além do tradicional quadro, giz e apagador. Portanto, quanto mais ferramentas obtivermos para levar os alunos a experimentar a física, maiores são as chances de eles se interessarem por essa área ou de enriquecerem sua visão sobre o mundo que os rodeia.

Recebido em: 20 de Julho de 2022

Aceito em: 9 de Agosto de 2022

Referências

- [1] C.C.C. Pimenta, P.A. Lopes, *Revista Cadernos de Estudos e Pesquisa na Educação Básica* 3, 52 (2017).

- [2] A.S. Ribas, S.C.R. Silva, J.R. Galvão, *Telefone Celular como Recurso Didático no Ensino de Física*. (UTFPR, Curitiba, 2015), 1ª ed.
- [3] M.C. Borba, H.D.G. Lacerda, *Educação Matemática Pesquisa* **17**, 490 (2015).
- [4] M.C.M. Bento, R.S. Cavalcante, *ECCOM* **4**, 113 (2013).
- [5] S.C.F. Batista, G.T. Barcelos, *RENOTE* **11**, 1 (2013).
- [6] Arduino Science Journal, *Module Acceleration*. Disponível em <https://science-journal.arduino.cc/sj/module/motion/lesson/acceleration>, acessado em 25/06/2022.
- [7] J.C. Castro-Palacio, L. Velazquez, J.A. Gómez-Tejedor, F.J. Manjón, J.A. Monsoriu, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **36**, 2315 (2014).
- [8] A.C.P. Fernandes, L.T.S. Auler, J.A.O. Huguenin, W.F. Balthazar, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **38**, e3504 (2016).
- [9] J.L.D. Laccio, G. Vitale, R. Alonso-Suárez, N. Pérez, S. Gil, *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias* **14**, 637 (2017).
- [10] I. Salinas, M.H. Giménez, J.A. Monsoriu, J.C.C. Palacio, *Modelling in Science Education and Learning* **11**, 15 (2018).
- [11] A. Tavares, A. Silva, C. Chesman, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **44**, e20220084 (2022).
- [12] H.M. Nussenzweig, *Curso de Física Básica: Fluidos, Oscilações e Ondas, Calor*. (Blucher, São Paulo, 2002), 4ª ed., v. 2, p. 147.
- [13] W. Bonventi Junior, N. Aranha, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **37**, 2504 (2015).
- [14] Portal Economaster, Disponível em <https://economaster.com.br/master-utilidades/gerador-de-tons-online/>, acessado em 25/06/2022.
- [15] P.A. Tipler, G. Mosca, *Física para Cientistas e Engenheiros* (LTC, Rio de Janeiro, 2006), 5ª ed., v. 1, p. 527.
- [16] M.A. Moreira, *Revista Qrrriculum* **25**, 29 (2012).
- [17] E.G. Alves, A.L.M. Santos, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **43**, e20210146 (2021).
- [18] L.C. Quima, *O Smartphone como Laboratório de Física*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2018.
- [19] Website Arduino Science Journal, Disponível em <https://science-journal.arduino.cc/>, acessado em 01/08/2022.