

# Um experimento simples para a exploração do Efeito Doppler de uma fonte sonora em movimento em relação a um detector fixo

.....  
**Marcelo Augusto Alves da Silva<sup>1</sup> e Thiago Alves de Sá Muniz Sampaio<sup>1#</sup>**

<sup>1</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano, Campus Salgueiro, Salgueiro, PE, Brasil.

## RESUMO

*O efeito Doppler é um fenômeno bastante conhecido e mencionado em aulas de ondulatória e acústica. Porém, são poucas as tentativas de se realizar alguma demonstração prática desse efeito em sala de aula. Em virtude disso, este artigo propõe um experimento de fácil acessibilidade para o ensino de física, analisando o fenômeno do efeito Doppler de forma qualitativa e quantitativa. O experimento proposto baseia-se na utilização de uma fonte sonora programada inicialmente para emitir ondas sonoras senoidais audíveis de diferentes frequências. Com a utilização de alguns softwares como o Tracker e o Audacity, foi possível, ao realizar vários arremessos da fonte sonora, medir sua velocidade e a frequência do som observada por um detector durante a aproximação. Com isso, foi possível determinar a velocidade de propagação do som no ar e demonstrar que o resultado concorda com o esperado pela teoria.*

**Palavras-chave:** experimentação; acústica; efeito Doppler; velocidade do som

.....

## 1. Introdução

O uso de experimentos para o ensino de ciências é muito importante para o processo de aprendizagem, visto que concilia a teoria estudada com a parte prática. A falta de interesse do aluno pelo conteúdo estudado se deve, em muitos casos, ao fato de que as aulas tradicionais não conseguem capturar sua atenção. Além disso, não é comum nesse tipo de aulas relacionar as matérias com atividades e conhecimentos do dia a dia do aluno. Segundo Nardi [1]:

A ciência é uma troca irreduzível entre o experimento e a teoria, e assim, a separação total entre o experimento e a teoria não é desejável e nem possível.

Para Rosito [2], no ensino de ciências a experimentação e a teoria andam lado a lado, e os resultados obtidos em laboratório complementam o que foi exposto em aula. O autor ainda destaca que:

A experimentação é essencial para um bom ensino de ciências. Em parte, isso se deve ao fato que o uso de atividades práticas permite maior interação entre o professor e os alunos, em muitas ocasiões, a oportunidade de um planejamento conjunto e o uso de estratégias de ensino que podem levar à melhor compreensão dos processos de ciências.

Porém, essa prática na maioria das vezes não acontece nas escolas, pois estas geralmente não possuem laboratórios e acesso a materiais para práticas experimentais. Este trabalho traz como

proposta um experimento acessível para o ensino de física que possa ser realizado em sala de aula. O conteúdo retratado no experimento é o “famigerado” efeito Doppler, numa situação em que uma fonte sonora se aproxima de um observador em repouso.

## 2. Efeito Doppler

Em 1942, um físico matemático austriaco chamado Johann Christian Doppler (1803-1853), observando as cores da luz emitida por estrelas duplas, previu um fenômeno que se aplica a todos os movimentos ondulatórios e posteriormente foi denominado efeito Doppler-Fizeau. Tal efeito acontece quando há uma velocidade relativa entre a fonte e o observador. Em relação às ondas luminosas, o efeito se observa na alteração da visualização da cor da luz emitida pela fonte.

No som, tal efeito é observado, por exemplo, quando uma ambulância com a sirene ligada passa rapidamente por nós: quando ela se aproxima, notamos um som mais agudo, e quando ela vai se afastando o som fica mais grave [3]. Isso está relacionado diretamente com a frequência de oscilação da onda sonora: quando uma fonte de som se aproxima de um detector, este perceberá uma frequência sonora maior, acontecendo o contrário quando a fonte se afasta do detector. Nesse experimento, a fonte sonora aproxima-se de um detector em repouso, e a equação do efeito Doppler nesse caso específico é dada por

$$f' = f \frac{v}{v - u}, \quad (1)$$

onde  $f'$  é a frequência observada,  $f$  a frequência emitida pela fonte,  $v$  é a velocidade do som no ar e  $u$  é a velocidade da fonte em relação ao ar [4]. Com os valores das frequências e a velocidade da fonte, é possível determinar a velocidade

#Autor de correspondência: thiago.muniz@ifsertao-pe.edu.br.

de do som no ar. Isolando  $v$  na Eq. (1), obtém-se

$$v = \frac{f'u}{f' - f}, \quad (2)$$

que será utilizada para obter a velocidade do som de modo experimental.

### 3. Velocidade de propagação do som: modelo de gás ideal

A velocidade do som pode ser estimada por um modelo teórico simples se considerarmos que o ar se comporta aproximadamente como um gás ideal, e que a propagação do som, que consiste em rápidas mudanças de pressão e densidade do ar (compressão e rarefação), pode ser aproximada como um processo adiabático. Nesse tipo de modelo, a velocidade do som dependerá de alguns fatores, como da temperatura em que o ambiente se encontra [5], podendo ser verificada por meio da equação

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{m}}, \quad (3)$$

em que  $\gamma$  é o coeficiente de expansão adiabática, que representa a razão entre as capacidades térmicas a pressão e volume constantes,  $R$  é a constante universal dos gases ideais,  $T$  é a temperatura (em Kelvin) do ambiente onde o som está se propagando e  $m$  é a massa molecular do gás considerado.

A fim de reescrever a Eq. (3) em função da velocidade do som no ar a uma temperatura de  $0^\circ\text{C}$ , que corresponde a  $331,45\text{ m/s}$ , podemos elevar a Eq. (3) ao quadrado e multiplicar o numerador e denominador por  $T_0 = 273,16\text{ K}$ , que representa a temperatura em Kelvin equivalente a  $0^\circ\text{C}$ , obtendo assim:

$$v^2 = \frac{\gamma RT_0}{m} \frac{T}{T_0}, \quad (4)$$

Fazendo  $T = \theta + 273,16$ , onde  $\theta$  é a temperatura em graus Celsius, a Eq. (4) torna-se

$$v^2 = \frac{\gamma RT_0}{m} \left( \frac{\theta}{273,16} + 1 \right). \quad (5)$$

É possível notar que  $\frac{\gamma RT_0}{m}$  é a velocidade do som ao quadrado a  $0^\circ\text{C}$ . Dessa forma, tirando a raiz quadrada da Eq. (5), ficamos com uma expressão simplificada que depende apenas da temperatura  $\theta$  do ar em  $^\circ\text{C}$ :

$$v = 331,45 \sqrt{\frac{\theta}{273,16} + 1}. \quad (6)$$

Durante toda a realização do experi-

mento que será descrito a seguir, a temperatura média do local variou entre  $30^\circ\text{C}$  e  $35^\circ\text{C}$ . Assumindo um limite inferior como  $30^\circ\text{C}$ , a velocidade do som no ar calculada a partir da Eq. (4) é de  $349,17\text{ m/s}$ . Assumiremos tal valor como um resultado teórico para fins de comparação.

### 4. Montagem e descrição do experimento

O experimento é formado por uma minicaixa de som com cartão de memória, um fio de aço ou pesca de 2 a 4 m, arame liso de aproximadamente 10 cm, uma flanela, smartphone, *notebook* e três carteiras. A montagem se deu da seguinte maneira: o arame foi manuseado de forma que as duas extremidades se acoplassem à minicaixa de som em uma espécie de argola em formato de “v”; para fixá-lo, foi utilizada parte do fio de aço, amarrado em várias voltas ao redor da caixinha, como mostra a Fig. 1.

Em seguida, o restante do fio foi amarrado em duas carteiras em linha

reta, de forma que ficasse bem tensionado. Após isso, a caixinha com o arame já acoplado foi pendurada no fio. A flanela foi presa em uma das extremidades do fio de aço, com o objetivo de amortecer o impacto

da caixinha na carteira. O *notebook* foi posicionado de modo que o seu microfone interno ficasse voltado para a passagem da caixa de som, para que dessa forma fosse possível capturar o áudio emitido pela caixa. O aparelho celular foi usado para a filmagem. A Fig. 2 mostra como ficou a montagem final do experimento.

No experimento, a minicaixa de som faz o papel da fonte sonora e o *notebook*, do detector (ou observador). O áudio de frequência conhecida é gerado no *software* Audacity (onda senoidal) e então passado para o cartão de memória da caixa, que será a fonte sonora que irá se aproximar e afastar do detector (em repouso), para se verificar se o efeito Doppler é percebido. Para observar e quantificar tal efeito, foi necessária a utilização dos *softwares* Audacity e Tracker.

#### 4.1. Uso dos softwares Audacity e Tracker

O Audacity é um *software* gratuito



Figura 1 - Minicaixa de som acoplada com o arame.

bastante utilizado para o ensino de física. Nele, podemos fazer diversos tipos de edições em diferentes formatos de arquivos de áudio. Ribeiro *et cols.* [6] utilizaram o programa

**Ondas senoidais de diferentes frequências foram geradas pelo software Audacity e colocadas no cartão de memória da caixa de som (fonte sonora). Durante os arremessos, áudio e vídeo eram capturados por instrumentos fixos, para analisar a frequência e o movimento da fonte**

para o ensino de ondas, ao passo que Pileri *et cols.* [7] usaram o *software* para o ensino de acústica. No experimento proposto neste trabalho, o Audacity serviu para diferentes funções: a partir dele fo-

ram geradas frequências diferentes de ondas senoidais para a análise do efeito Doppler. Inicialmente, a frequência gerada foi de  $3.000\text{ Hz}$  e exportada – em formato de áudio mp3 através de um cartão de memória – para uma caixinha de som recarregável. O mesmo procedimento foi repetido para as outras frequências geradas, que foram de  $4.000\text{ Hz}$ ,  $5.000\text{ Hz}$ ,  $6.000\text{ Hz}$ ,  $7.000\text{ Hz}$ ,  $8.000\text{ Hz}$ ,  $9.000\text{ Hz}$ ,  $10.000\text{ Hz}$ ,  $12.000\text{ Hz}$ ,  $13.000\text{ Hz}$ ,  $14.000\text{ Hz}$  e  $15.000\text{ Hz}$ . Com o som sendo emitido pela caixinha, a opção de gravação de áudio no Audacity era acionada no *notebook*, que foi devidamente posicionado para poder capturar o áudio referente à frequência da fonte no momento da aproximação. Em sequência, a caixinha era lançada rapidamente, com a mão, de uma das extremidades do fio até a outra, sendo seu impacto amortecido pela flanela.

Com o auxílio de um smartphone, foram filmados os deslocamentos da caixinha para cada frequência, a fim de realizar a medição das suas velocidades

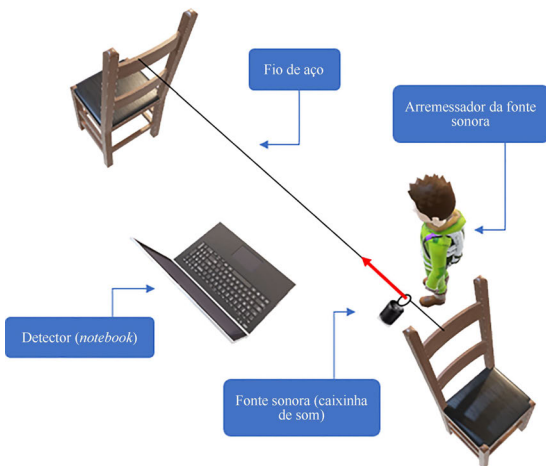


Figura 2 - Montagem final do experimento e diagrama esquemático da montagem.

por meio do *software* gratuito Tracker, que permite analisar conceitos físicos por meio de vídeos. O papel principal desse *software* nesse experimento foi analisar as filmagens da aproximação da fonte sonora do detector, verificando a velocidade com que a caixinha estava se movendo no decorrer do fio, que corresponde justamente à velocidade da fonte na análise do efeito Doppler.

## 5. Resultados e análise do experimento

A Fig. 3 mostra uma captura de tela retirada do Audacity, correspondendo ao formato de onda quando a fonte se aproxima do notebook. Percebe-se que na área vermelha em destaque a amplitude da onda cresce ao se aproximar do observador e decresce quando começa a se afastar. Com base na análise da amplitude, é possível selecionar, para a análise de frequências, apenas um pequeno trecho do áudio capturado, que corresponde ao momento em que a fonte sonora está se aproximando e passando pelo ponto mais próximo do detector.

Já na Fig. 4, temos o espectro de frequências obtido por meio do Audacity no momento da aproximação da fonte do detector. A área circulado em vermelho são os picos de frequências detectadas quando a fonte sonora se aproxima.

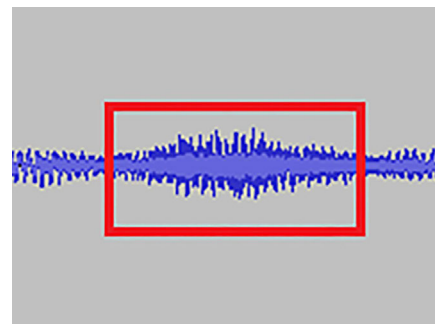


Figura 3 - Formato de onda capturado do Audacity.

Como mencionado, as medições da velocidade da fonte deram-se pelo programa Tracker. A Fig. 5 é uma captura da análise do vídeo depois que a caixa de som é lançada e se aproxima do *notebook*. É possível verificar sua velocidade em diferentes pontos, sendo que era praticamente constante quando se aproximava do microfone do *notebook*.

Como estamos interessados na detecção da maior frequência, na aproximação da fonte sonora do observador (e no ponto de maior amplitude), é interessante escolher um ponto em que a caixinha de som esteja bem próxima do computador e, a partir desse ponto, determinar a velocidade da fonte.

De posse das frequências emitidas e observadas e da velocidade da fonte, foi determinada a velocidade do som no ar a partir da Eq. (2). A Tabela 1 contém as 12 frequências emitidas pela fonte, as frequências detectadas pelo observador, a velocidade da fonte e a velocidade do som obtida para cada caso.

Analisando a tabela acima, podemos notar que o *notebook* (detector) obteve frequências maiores na aproximação da caixinha (fonte sonora), o que é

Na área circulado em verde na figura, temos um dos valores da frequência observada e sua intensidade em decibéis.

No experimento, foi possível verificar que, além do ruído do ambiente, há também o som provocado pelo atrito do suporte da caixa de som com o fio de aço. No entanto, como é possível ver pela Fig. 4, todos esses sons têm maior amplitude em frequências baixas e, portanto, não se confundem com as frequências superiores a 3.000 Hz que foram escolhidas para serem emitidas pela caixa de som.

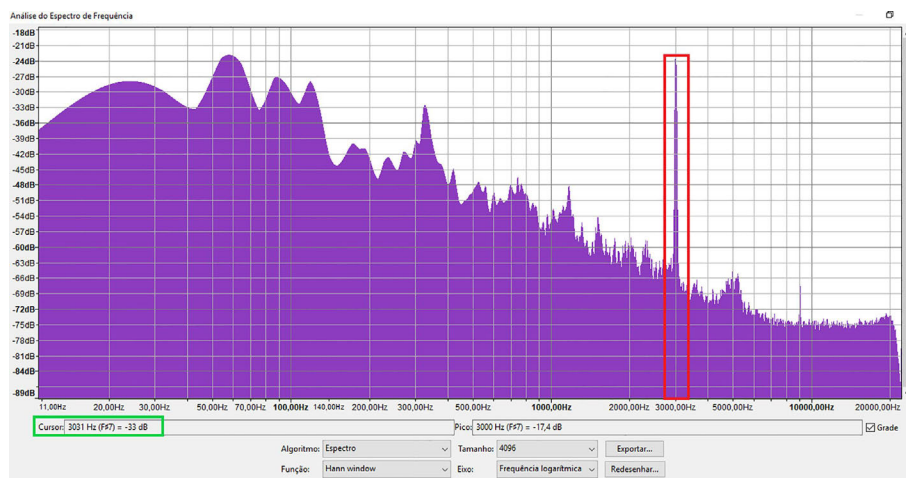


Figura 4 - Espectro de frequência de uma onda sonora de 3.000 Hz ao se aproximar da fonte.

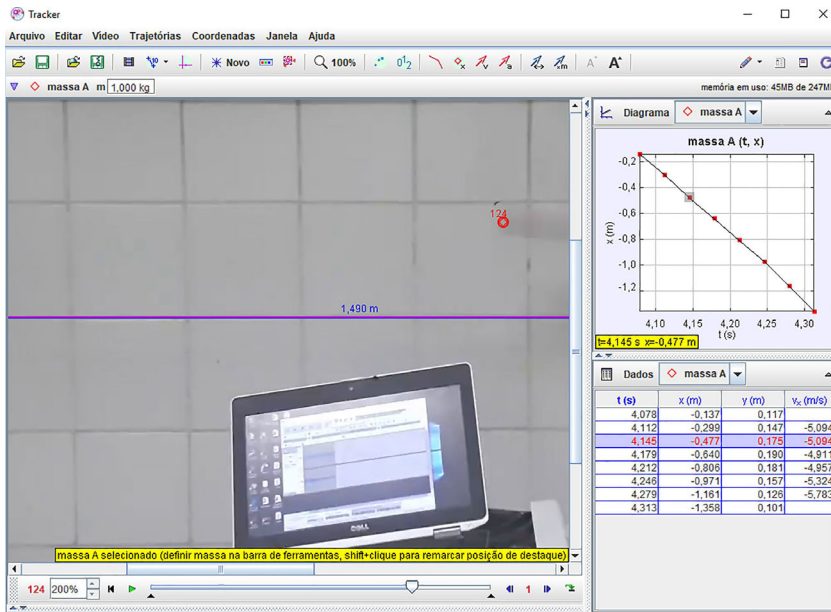


Figura 5 - Captura da tela do Tracker na análise de vídeo.

Tabela 1: Frequências emitidas e observadas, velocidade da fonte e do som correspondentes.

$f$ (Hz)	$f'$ (Hz)	$u$ (m/s)	$v$ (m/s)
3000	3031	3,770	$368,61 \pm 21,65$
4000	4058	5,200	$363,82 \pm 21,65$
5000	5084	5,543	$335,48 \pm 21,65$
6000	6089	5,094	$348,51 \pm 21,65$
7000	7120	6,050	$358,97 \pm 21,65$
8000	8127	4,790	$306,52 \pm 21,65$
9000	9111	4,010	$328,32 \pm 21,65$
10000	10152	5,225	$348,97 \pm 21,65$
12000	12159	4,580	$350,24 \pm 21,65$
13000	13148	4,362	$387,51 \pm 21,65$
14000	14217	5,685	$372,46 \pm 21,65$
15000	15189	4,498	$361,48 \pm 21,65$
	Média		$352,57 \pm 6,25$
	Desvio Padrão (DP)		21,65
	DP da média		6,25

previsto pelo efeito Doppler. No experimento, tal efeito também pode ser verificado de forma qualitativa: se uma pessoa fizer o papel de detector, perceberá um som mais agudo quando a fonte se aproxima. Foi visto, a partir da Eq. (4),

que a velocidade do som depende da temperatura do ambiente onde o som se propaga, logo teremos velocidades distintas em temperaturas diferentes. No experimento, a velocidade do som no ar obtida com temperatura ambien-

te entre 30 °C e 35 °C teve média de  $352,57 \pm 6,25$  m/s. Esse valor, dentro da incerteza estipulada no experimento, corresponde ao valor teórico obtido pela Eq. (6) da velocidade do som no ar a uma temperatura de 30 °C, que é de 349,17 m/s.

## 6. Considerações finais

O efeito Doppler é um fenômeno bastante conhecido e muito discutido em livros didáticos do Ensino Médio. Trabalhar com o conteúdo de forma experimental trará ótimos benefícios para os alunos. Um deles é poder ver na prática como tal fenômeno acontece. Outro aspecto relevante diz respeito à análise experimental com o uso de *softwares*, que pode ser realizada em grupos com os alunos. Os recursos utilizados pertencem de modo geral ao cotidiano dos alunos, o que torna o trabalho relativamente fácil de ser elaborado e realizado em salas de aula.

É interessante destacar que, diferentemente do experimento realizado por Lüker e cols. [8], que utilizou uma fonte sonora que atingia baixas velocidades e, desse modo, teve que utilizar frequências de ultrassom para produzir uma diferença significativa nas frequências observadas, as frequências sonoras geradas pela fonte sonora neste trabalho encontram-se dentro do intervalo audível, o que também permite a identificação do fenômeno de modo qualitativo por parte dos alunos.

Em relação aos resultados, é notório ver como tal experimento pode ser mostrar eficaz para o ensino de física, visto que foi possível explorar de forma didática o efeito Doppler e, além disso, calcular a velocidade do som com uma precisão razoável, dadas as condições do experimento. Em suma, acredita-se que o uso do experimento seja muito relevante para a compreensão do efeito Doppler e de suas aplicações, tanto para o Ensino Médio como para o ensino superior.

## References

- [1] R. Nardi, *Ensino de Ciências e Matemática I* (UNESP, São Paulo, 2009), v. 1, 258 p.
- [2] R. Berenice Alvares. In: *Construtivismo e Ensino de Ciências: Reflexões Epistemológicas e Metodológicas*. R. Moraes (org) (EDIPUCRS, Porto Alegre, 2003), p. 195-208.
- [3] J.R. Bonjorno, C.M. Ramos, E.P. Prado, V. Bonjorno, M.A. Bonjorno e cols., *Física 2: Terminologia, Óptica, Ondulatória*. (FTD, São Paulo, 2016), v. 2, 3<sup>rd</sup> ed. p. 261.
- [4] D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, *Fundamentos de Física: Gravitação, Ondas e Termodinâmica* (LTC, Rio de Janeiro, 2009), v.2, 3<sup>rd</sup> ed. p.166.
- [5] H.M. Nussenzveig, *Curso de Física Básica, 2: Fluidos, Oscilações e Ondas, Calor* (E. Blucher, São Paulo, 2014), v. 2, 5<sup>nd</sup> ed. p. 160.
- [6] T.G. Ribeiro, C.P. Senra, M.A. Resende, *Física na Escola*, **16**(1), 43 (2018).
- [7] H.G. Pieri, G. Dionisio, R. Caporal Filho, *Qualidades Fisiológicas do Som: Potencialidades da Aplicação de Softwares de Áudio no Ensino de Acústica*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Passo Fundo, Instituto de Ciências Exatas e Geociências. 2017.
- [8] E. Ludke, P.J. Cauduro, A.M. Vieira, R.B. Adornes, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, **34**, 1702 (2012).