

```

if(i==19) {
//Modelo exponencial para o NTC
Resistance=res*((1024.0/analogRead(e)) - 1.0);
Temp=log(Resistance/termres)/beta;
Temp=Temp+(1.0);
Temp=1./Temp;
//Saida serial de dados
Serial.print(ttubo/((media/20.))+248)); //248 us de atraso na emissão do sinal (típico do HC-SR04)
Serial.print(",");
Serial.println(Temp);
media=0;
i=0;}

```

Um experimento de baixo custo com Arduino para o estudo de ondas sonoras



**Michelle Belmiro Ilibio e
Mauricio Girardi#**

Coordenadoria Especial de Física,
Química e Matemática, Universidade
Federal de Santa Catarina, Araranguá,
SC, Brasil.

RESUMO

O desenvolvimento de experimentos sofisticados e de baixo custo para o ensino de física tem crescido significativamente com o surgimento de microcontroladores como o Arduino e seus clones. A vasta gama de sensores e acessórios facilmente integráveis permitem a construção de experimentos automatizados e monitorados por computador, bem como a exploração de fenômenos físicos antes inacessíveis. Nesse contexto, o presente trabalho demonstra a construção de um experimento para o estudo da propagação de ondas sonoras no ar. Para isso, utilizamos um sensor de ultrassom e de temperatura controlados por Arduino, a fim de obter a dependência da velocidade do som com a temperatura, bem como seu comportamento quando o ar está em movimento relativo. O experimento é de fácil construção e de baixo custo, podendo ser utilizado com microcomputadores ou dispositivos móveis, bem como adaptado para experimentação remota. Um aplicativo para dispositivos Android também foi desenvolvido, para a exibição gráfica dos dados em tempo real e mobilidade do experimento.

Palavras-chave: física experimental; ondas sonoras; Arduino; Ensino Médio



1. Introdução

A utilização de novas tecnologias para o ensino tem se popularizado e atraído tanto profissionais de ensino quanto entusiastas amadores para o desenvolvimento de dispositivos experimentais voltados ao estudo das diferentes áreas da física. O baixo custo e a facilidade de acesso a dispositivos móveis, computadores e microcontroladores, bem como a uma miríade de sensores aliados a softwares de desenvolvimento cada vez mais intuitivos, permitem a elaboração de experimentos sofisticados que podem ser replicados em escolas e universidades.

Particularmente, o estudo de ondas sonoras nos diferentes níveis foi aprimorado com o surgimento de experimentos que abordam os diferentes aspectos da propagação do som no ar e em outros meios materiais. Muitas são as técnicas e aparatos experimentais já propostos para obtenção da velocidade do som, todas com suas vantagens e desvantagens, explorando aspectos distintos da propagação de ondas sonoras. Baraúna e cols. [1] utilizou um osciloscópio e um gerador de sinais para, a partir das figuras de Lissajous, obter a velocidade do som no clássico experimento do tubo ressonante. O resultado obtido para velocidade do som concorda com a previsão teórica e a abordagem por figuras de Lissajous e traz à tona a ideia da superposição de movimentos ondulatórios.

Lüdke e cols. [2] propõe a construção de dois circuitos, um transmissor e um receptor de ultrassom, tendo o re-

ceptor dois microfones distanciados entre si. Conectado à placa de som de um computador, permite obter o intervalo de tempo entre os sinais recebidos pelos dois microfones e assim calcular a velocidade do som. Além disso, movendo-se o transmissor a velocidade constante na direção do receptor, foi possível estudar o efeito Doppler-Fizeau pelo desvio da frequência da onda recebida. Já Da Silveira e cols. [3] empregou a plataforma Arduino para o ensino inclusive de ondas sonoras, explorando o funcionamento do sensor de distância ultrassônico, mas sem obter a velocidade do som.

Velasco e cols. [4] utilizou uma construção mais sofisticada com um tubo de ar cuja temperatura é controlada por um fluxo de água, para obter a dependência da velocidade do som com a temperatura. Nesse caso, um *data logger* conectado a um computador e um gerador de sinais mede o intervalo de tempo entre a emissão e a recepção de um sinal no interior do tubo e, conseqüentemente, a velocidade do som.

Por fim, Hahn e cols. [5] empregou sensores de temperatura e o sensor de ultrassom HC-SR04 para estimar a dependência entre a velocidade do som e a temperatura, pelo tempo de voo do pulso emitido e refletido por uma barreira.

No presente trabalho, reunimos algumas ideias presentes nos trabalhos acima citados para desenvolver um dispositivo experimental utilizando Arduino que alia fácil construção, baixo custo e mobilidade para explorar não apenas a dependência da velocidade do som

O baixo custo de dispositivos móveis, computadores sensores, aliados a softwares de desenvolvimento cada vez mais intuitivos, permitem a elaboração de experimentos sofisticados que podem ser replicados em escolas e universidades

#Autor de correspondência. E-Mail: mauricio.girardi@ufsc.br.

com a temperatura mas também discutir o problema do movimento relativo na propagação do som no ar em movimento. Produzimos também uma interface gráfica para dispositivos móveis que permite representar graficamente os dados em tempo real enquanto o experimento é alimentado pelo celular ou *tablet*. O *software* de aquisição de dados gravado no microcontrolador Arduino foi também adaptado para minimizar os erros no cálculo do tempo entre transmissão e recepção do sinal sonoro.

Dividimos o artigo como se segue: na seção 2, apresentamos os detalhes de construção e funcionamento do dispositivo, bem como diagramas e esquema do circuito. Nessa seção também são discutidos detalhes do funcionamento dos *softwares* de aquisição e tratamento dos dados. Na seção 3, descrevemos as possíveis aplicações do dispositivo na obtenção de algumas propriedades de propagação das ondas sonoras no ar e, por fim, na seção 4 apresentamos as conclusões e perspectivas.

2. Hardware e software

O experimento aqui apresentado é composto por um *hardware* com os sensores de ultrassom e temperatura ligados ao microcontrolador do Arduino Nano, montado em uma estrutura tubular, e também dois programas para controle, aquisição e tratamento de dados. Descreveremos a seguir os detalhes de cada elemento do dispositivo experimental.

2.1. Hardware e funcionamento

Na Fig. 1 mostramos em duas perspectivas o equipamento em sua montagem final. Nesse protótipo, foram utilizados os seguintes componentes:

- Tubo de PVC com diâmetro de 10 cm e 1 m de comprimento
- Arduino Nano
- Sensor ultrassônico HC-SR04
- Resistor de 10 kΩ
- Termistor NTC de 10 kΩ
- Placa de fenolite perfurada
- Cabo blindado mono
- Conectores, parafusos, cintas plásticas, fios, solda, cabo USB

A ideia central de seu funcionamento é a utilização do sensor de distância ultrassônico HC-SR04 com os elementos piezoelétricos de transmissão e recepção separados e fixados nas extremidades de um tubo, como na Fig. 2. Um pulso de ultrassom de 40 kHz é produzido e o intervalo de tempo entre

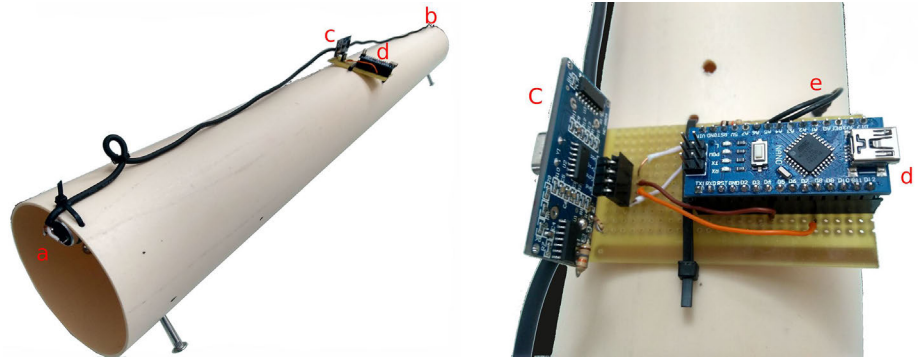


Figura 1 - Imagens do dispositivo com alguns detalhes da construção. Em (a) e (b) temos o transmissor e receptor piezoelétricos conectados ao HC-SR04 (c) por cabos blindados, o Arduino Nano em (d) e o NTC em (e).

transmissão e recepção (tempo de voo) é obtido pelo microcontrolador Arduino. A velocidade do som é então obtida conhecendo-se o comprimento do tubo. A aquisição do tempo de voo é crítica e envolve a utilização de *timers* presentes no Arduino, como será discutido mais adiante. Com um termistor NTC (dispositivo cuja resistência decresce com a temperatura), a temperatura do ar no interior do tubo também é medida.

Utilizando-se um soprador (secador de cabelos), pode-se forçar a passagem de ar em ambos os sentidos no interior do tubo, bem como aquecê-lo. Assim se obtém, de forma qualitativa e quantitativa, a dependência da velocidade do som no ar com a temperatura e as propriedades de propagação em meio em movimento (problema da velocidade relativa).

Por meio de conexão via porta USB entre o Arduino e um computador, *tablet* ou celular, faz-se a alimentação do dispositivo, bem como a coleta de dados (temperatura e velocidade do som). Note que, para utilização com aparelhos celulares e *tablets* Android é necessário que eles sejam compatíveis com cabo tipo USB-OTG (On-The-Go), que permite que tais dispositivos possam se comportar como controladores de outros aparelhos, tais como impressoras, *pendrives* etc.

Na Fig. 3, temos um diagrama esquemático do circuito. O *trigger* do HC-SR04 deve ser conectado à porta D8 para o correto funcionamento. Já a escolha das demais portas digitais e analógicas (D4 e A7) para conexão da porta *echo* e do termistor não é crítica, podendo ser facilmente alterada no código

gravado no microcontrolador.

O termistor (N) e o resistor (R_e) de 10 kΩ formam um divisor de tensão que permite obter a resistência do termistor pela equação:

$$R_T = R_e \left(\frac{V}{V_T} - 1 \right), \quad (1)$$

onde $V = 5 \text{ V}$ e V_T é a tensão no pino analógico A7. A temperatura é então calculada em Kelvin pela Eq. (6):

$$T = \frac{1}{\frac{1}{B} \ln \left(\frac{R_T}{R_{25}} \right) + \frac{1}{273.15}}, \quad (2)$$

onde $R_{25} = 10 \text{ k}\Omega$ e B pode ser obtido no *datasheet* do termistor ou por calibração com um termômetro externo.

Vale aqui enfatizar que a temperatura pode ser obtida também pelo uso do sensor LM35, muito utilizado com Arduino e com precisão menor que 1 °C, sem necessidade de calibração externa.

Optou-se aqui pelo uso do NTC por ser mais facilmente encontrado em sucatas de eletrônica.

Os elementos piezoelétricos são conectados à placa do HC-SR04 por meio de cabos blindados (tipo de áudio mono), a fim de evitar ruídos eletromagnéticos que possam gerar leituras espúrias

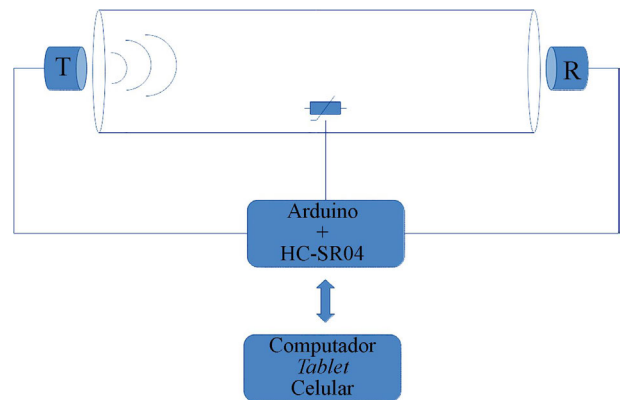


Figura 2 - Diagrama esquemático do experimento.

as no sensor. O termistor foi inserido no interior do tubo por um pequeno orifício.

A montagem do equipamento demanda apenas conhecimentos básicos em eletrônica e o dispositivo pode ser construído por menos de R\$ 60,00 (em valores de 03/2020) com componentes novos ou por ainda menos com peças obtidas de sucata.

2.2. Detalhes da construção

O dispositivo aqui apresentado tem construção bastante simples, mas que demanda algum detalhamento. O ponto de maior atenção é o da separação dos transdutores no HC-SR04. O receptor (R) e o transmissor (T) são ambos soldados lado a lado na placa de circuito impresso e precisam ser dessoldados com cuidado. Pode-se notar na parte traseira de cada transdutor as letras R e T, que indicam suas funções. Os cabos blindados devem ser então soldados na placa e nos transdutores. Note que receptor e transmissor não têm polaridade. Todavia, o cabo blindado em R deve ter sua malha externa soldada no terminal da placa conectado ao terra, como visto na Fig. 3. Os transdutores podem agora ser fixados nas extremidades do tubo por braçadeiras.

Uma alteração importante, mas opcional, tendo em vista a necessidade de mudanças no circuito, foi realizada no sensor HC-SR04, a fim de melhorar sua sensibilidade. Tal dispositivo, em alguns modelos, apresenta uma falha de projeto, como pode ser verificado na Ref. [7]. Nela, o filtro na entrada do re-

ceptor foi dimensionado para 18 kHz e não para 40 kHz, a frequência de trabalho dos elementos piezoelétricos. Dessa forma, a substituição de dois resistores no filtro de passa faixa, como detalhado na Ref. [7], desloca seu centro para 40 kHz. Com tal alteração, minimizam-se instabilidades na recepção dos pulsos de ultrassom, melhorando o desempenho do equipamento.

As demais conexões elétricas entre Arduino, resistor, NTC e HC-SR04 devem ser soldadas, para dar estabilidade mecânica, e o circuito como um todo fixado na parte externa do tubo. Como comentado anteriormente, o NTC deve ser inserido em um pequeno orifício no centro do tubo e então fixado com cola quente.

Por fim, pequenos pés nas extremidades do tubo evitam que ele se mova na bancada.

2.3. Programação do Arduino e interface gráfica

Como afirmado anteriormente, a leitura do tempo de voo é crítica nessa aplicação. Muitas discussões sobre as limitações do HC-SR04 podem ser vistas na literatura, [8] sendo que o erro estimado na medida do tempo é da ordem de 25 μ s. Além disso, o erro no processo de aquisição de dados pode chegar a 100 μ s, o que geraria uma variação total de 13 m/s na medida da velocidade.

Algumas estratégias são apontadas para melhorar ambos os erros, o que inclui uma modificação do *hardware* do HC-SR04 (que é bastante complicado e não sugerido neste caso) e uma aborda-

gem diferente na aquisição de dados. Nesta última, a indicação é não utilizar as bibliotecas padrão da HC-SR04, como a *NewPing* [9].

Assim, utilizou-se o *timer* do Arduino no modo de “captura de entrada”, [10] no qual uma mudança de estado da porta D8 (*trigger*) salva o estado do *timer1* em um registrador e gera uma interrupção. Com esse método, temos uma resolução de 1 μ s, além de evitarmos atrasos devidos a outras interrupções. São realizadas ainda médias com 20 amostras, antes de se calcular a velocidade do som.

Dessa forma, pequenas variações de temperatura e deslocamentos de ar dentro do tubo podem ser observadas, permitindo-se a avaliação quantitativa das propriedades das ondas sonoras no ar.

No Anexo 1, transcrevemos o código utilizado na programação do Arduino.

Além do *software* para aquisição de dados para Arduino, desenvolvemos uma aplicação para dispositivos móveis para representação gráfica dos dados em tempo real. Esse aplicativo foi criado com auxílio do MIT App Inventor e pode ser editado ou baixado na Ref. [11]. Após baixá-lo, é necessário instalá-lo no dispositivo móvel. A Fig. 4 mostra uma impressão de tela desse aplicativo. A interface simples permite que se apresentem a velocidade do som e a temperatura em função do tempo, com ajuste manual ou automático de escala. A comunicação com o Arduino via cabo USB-OTG é feita com a USB Serial Bridge encontrada na Ref. [12].

Para a execução do experimento em computadores com sistemas operacionais Windows ou Linux, pode-se utilizar o monitor de porta serial da ferramenta de desenvolvimento do Arduino ou outro programa gratuito como *SerialPlot* [13].

3. Aplicações e discussões

O equipamento aqui apresentado foi testado em experimentos envolvendo a dependência da velocidade do som com a temperatura e o problema do movimento relativo quando o som se propaga no ar em movimento.

No primeiro caso, o da dependência da velocidade do som com a temperatura, duas atividades, sendo uma demonstrativa (qualitativa) e outra quantitativa, podem ser propostas.

Como é sabido para gases ideais, a velocidade do som pode ser obtida de

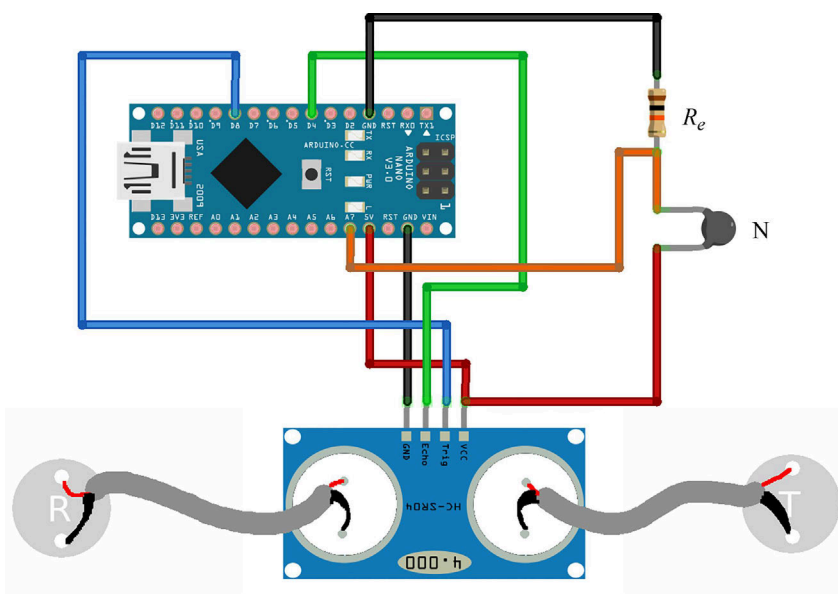


Figura 3 - Diagrama esquemático do circuito eletrônico.

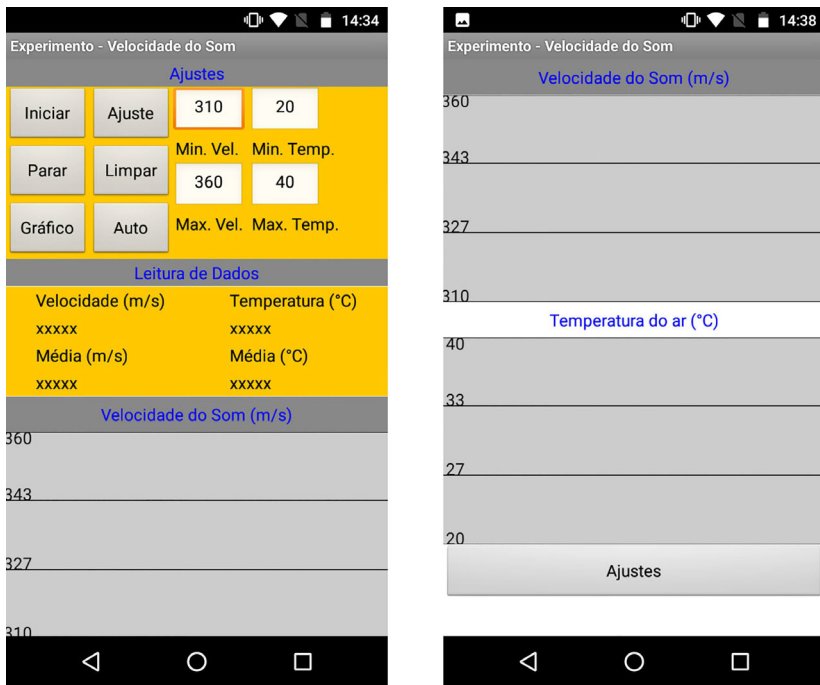


Figura 4 - Interface gráfica executada em um dispositivo móvel Android. Destacam-se, à esquerda, os ajustes manual e automático de escala e, à direita, a representação gráfica da velocidade do som e da temperatura em função do tempo (eixo horizontal sem escala).

[14]:

$$v_{som} = \frac{\sqrt{\gamma k T}}{m}, \quad (3)$$

onde γ é o coeficiente de expansão adiabático, definido como a razão entre os calores específicos a pressão e a volume constantes (C_p/C_v), k é a constante de Boltzmann, T a temperatura e m a massa molecular do gás. Assim, podemos afirmar que a velocidade do som varia monotonicamente com a temperatura e cresce (decresce) com o aumento (diminuição) da temperatura.

Dessa forma, no experimento qualitativo, com o auxílio de um secador de cabelos, aquece-se o tubo de PVC e assim o ar em seu interior. Fazemos isso fechando as extremidades do tubo para não haver circulação do ar internamente. O efeito do aquecimento do tubo pode ser visto na Fig. 5a, onde temos um salto na velocidade no instante em que o tubo é aquecido. O mesmo experimento foi realizado envolvendo-se o tubo com tecidos umedecidos com água gelada (0 °C), após o que vemos na Fig. 5b o decréscimo da velocidade do som.

Nesses casos, temos apenas o comportamento qualitativo para dependência da velocidade do som com a temperatura, já que não podemos garantir

que a temperatura do ar no interior do tubo seja aquela medida pelo termistor. Isso ocorre porque o sistema não está em equilíbrio térmico com o meio e o termistor não está completamente iso-

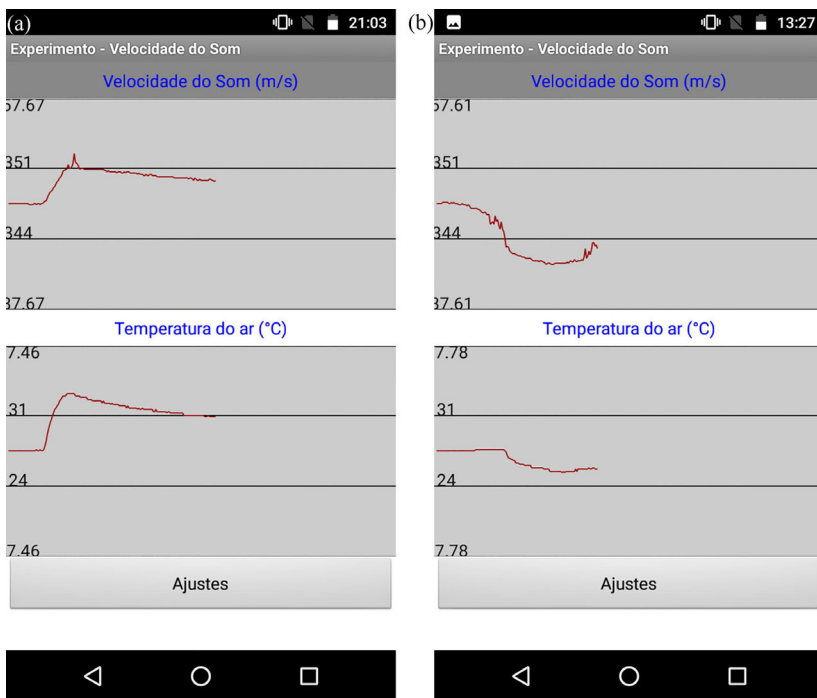


Figura 5 - Gráficos da velocidade do som e da temperatura em função do tempo. Em (a) o sistema foi aquecido com um secador de cabelos e em (b) foi resfriado com panos úmidos em água gelada.

lado no interior do tubo.

Todavia, um experimento quantitativo pode ser feito durante intervalos de tempo maiores (horas ou dias), nos quais se monitora a temperatura e a velocidade do som com o sistema em equilíbrio com o ambiente. Em salas climatizadas e em dias com grandes amplitudes térmicas é possível, com os dados obtidos, fazer-se um ajuste pela Eq. 3. Na Fig. 6 são mostrados os resultados para velocidade do som em função da temperatura, comparados com os dados experimentais da Ref. [4]. É importante notarmos que nessa escala de temperatura o comportamento da curva é aproximadamente linear. Nesse experimento, uma sala pré-aquecida teve sua temperatura diminuída lentamente de 31,7 °C para 27,5 °C. Os resultados são coincidentes nessa faixa de temperaturas, concordando inclusive com o modelo teórico dado pela Eq. (3). Todavia, para temperaturas mais baixas (dados não apresentados), o comportamento parece divergir da curva teórica, o que pode indicar um problema de calibração do termômetro via NTC (que não foi realizada nesse caso).

Outra atividade demonstrativa (qualitativa) envolve a ideia de movimento relativo quando o som se propaga em um meio que se move paralelamente à direção de propagação. Nesse caso, a velocidade do som pode ser es-

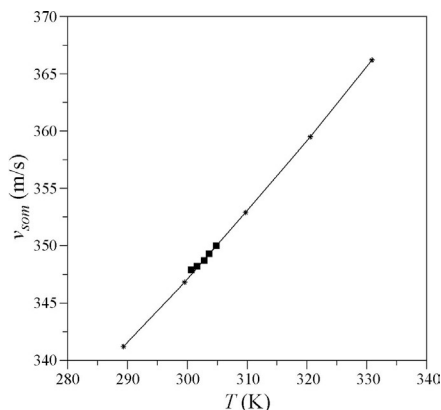


Figura 6 - Velocidade do som no ar em função da temperatura. Resultados obtidos com o dispositivo aqui apresentado (quadrados) e dados experimentais da Ref. [4].

crita como [15]

$$v = u + v_{som}, \quad (4)$$

onde u é a velocidade do ar na direção de propagação do som, sendo positiva se estiverem no mesmo sentido e negativa se em sentidos opostos.

Dessa forma, o experimento é realizado fazendo-se o secador de cabelo, com ar frio, soprar em cada lado. Na Fig. 7, apresentamos o aumento da velocidade do som ao direcionarmos o fluxo de ar para a extremidade com o transmissor, e sua diminuição com o fluxo na extremidade com o receptor.

4. Conclusões

O dispositivo aqui apresentado des-

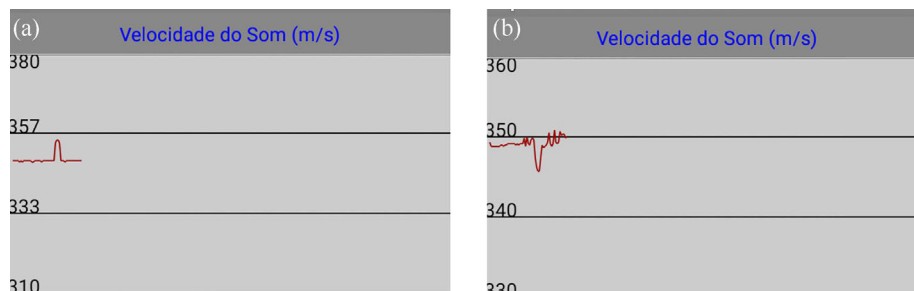


Figura 7 - Gráficos velocidade do som em função do tempo para (a) fluxo de ar no sentido de propagação do som e (b) no sentido contrário.

tina-se ao estudo de algumas propriedades de propagação do som no ar utilizando um sensor de ultrassom e de temperatura controlados por um microcontrolador Arduino.

A dependência da velocidade do som com a temperatura pode ser obtida de forma qualitativa em experimentos de demonstração, bem como de forma quantitativa, quando utilizado em experimentos mais longos (horas ou dias). O problema da velocidade relativa na propagação no ar em movimento também pode ser explorado, discutindo-se a necessidade de um meio material para a transmissão de ondas sonoras.

O baixo custo, a facilidade de construção e a possibilidade de conexão com dispositivos móveis tornam o dispositivo bastante atrativo para aplicação em laboratórios didáticos e para demonstrações em sala de aula.

A interface gráfica desenvolvida para esse experimento, embora simples, permite monitorar a velocidade

do som e a temperatura em função do tempo, juntamente com seus valores médios. Com poucas modificações, pode ainda incluir a possibilidade de gravação dos dados para análises posteriores.

Uma perspectiva interessante para esse dispositivo é sua adaptação para a experimentação remota. Nesse caso, basta a implementação de um controle, via relês, de dois secadores de cabelo, adaptados nas extremidades do tubo. Com quatro relês, seria possível o acionamento das ventoinhas e dos aquecedores, possibilitando a realização dos experimentos acima descritos via internet [16].

Agradecimentos

Os autores deste trabalho agradecem ao Governo do Estado de Santa Catarina (FUMDES/2019), à Universidade Federal de Santa Catarina e à Sociedade Brasileira de Física pelo apoio financeiro.

Material suplementar

Anexo 1: Código para programação da placa Arduino.

Referências

- [1] F. Baraúna, J. Furtado, S. Perez, Revista Brasileira de Ensino de Física, **37**, 3310 (2015).
- [2] E. Lüdke, P.J. Cauduro, A.M. Vieira, R.B. Adornes, Revista Brasileira de Ensino de Física, **4**, 1702 (2012).
- [3] M.V. da Silveira, R.B. Barthem, A.C. dos Santos, Revista Brasileira de Ensino de Física, **41**, e20180084 (2019).
- [4] S. Velasco, F.L. Román, A. González, J.A. White, American Journal of Physics, **72**, 276 (2004).
- [5] M.D. Hahn, F.A.O. Cruz, P.S. Carvalho, The Physics Teacher, **57**, 114 (2019).
- [6] A.P. Godse, U.A. Bakshi, *Basic Electrical And Electronics Engineering*, Technical Publications, 2007.
- [7] http://uglyduck.vajn.icu/ep/archive/2014/01/Making_a_better_HC_SR04_Echo_Locator.html, acessado em 26/03/2020.
- [8] <https://www.davidpilling.com/wiki/index.php/HCSR04>, acessado em 26/03/2020.
- [9] <https://playground.arduino.cc/Code/NewPing/>, acessado em 26/03/2020.
- [10] <https://people.ece.cornell.edu/land/courses/ece3400/Timer1/timer1.html>, acessado em 26/03/2020.
- [11] ai2.appinventor.mit.edu/?galleryId=6543501575192576, ou <https://drive.google.com/file/d/1oSuEJr3xm0NP1M96-6hluZdrkHeYX3v9/view?usp=sharing>, acessado em 26/03/2020.
- [12] <https://github.com/kinsamanka/usbfa1>, acessado em 26/03/2020.
- [13] <https://hackaday.io/project/5334-serialplot-realtime-plotting-software>, acessado em 26/03/2020.
- [14] H.M. Nussenzveig, *Curso de Física Básica* (Blucher, São Paulo, 2014), v. 2, 5ª. ed.
- [15] T. Rossing, *Handbook of Acoustics* (Springer, Berlin, 2007).
- [16] T.R. Barros, W.S. Dias, Revista Brasileira de Ensino de Física, **41**, e20190049 (2019).