



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CAMPUS AGRESTE
NÚCLEO DE FORMAÇÃO DOCENTE
CURSO LICENCIATURA EM FÍSICA

CÍCERO BRUNO DOS SANTOS SILVA

**CARACTERIZAÇÃO DA VELOCIDADE DO SOM NO MEIO POR VARIAÇÕES DE
TEMPERATURA: ABORDAGEM DIDÁTICA EXPERIMENTAL**

Caruaru
2025

CÍCERO BRUNO DOS SANTOS SILVA

**CARACTERIZAÇÃO DA VELOCIDADE DO SOM NO MEIO POR VARIAÇÕES DE
TEMPERATURA: ABORDAGEM DIDÁTICA EXPERIMENTAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Licenciatura em Física do Campus Agreste da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, na modalidade de MONOGRAFIA, como requisito parcial para a obtenção do título de LICENCIADO(A) EM FÍSICA.

Área de concentração: Ensino de Física experimental.

Orientador (a): Prof. Dr. João Francisco Liberato de Freitas.

Caruaru

2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Silva, Cícero Bruno dos Santos.

Caracterização da velocidade do som no meio por variações de temperatura:
abordagem didática experimental / Cícero Bruno dos Santos Silva. - Caruaru,
2025.

49 : il., tab.

Orientador(a): João Francisco Liberato de Freitas

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de
Pernambuco, Centro Acadêmico do Agreste, Física - Licenciatura, 2025.

Inclui referências, apêndices.

1. experimento. 2. ondas. 3. velocidade do som. 4. temperatura. 5. Arduino.
6. HC-SR04. I. Freitas, João Francisco Liberato de . (Orientação). II. Título.

530 CDD (22.ed.)

CÍCERO BRUNO DOS SANTOS SILVA

**CARACTERIZAÇÃO DA VELOCIDADE DO SOM NO MEIO POR VARIAÇÕES DE
TEMPERATURA: ABORDAGEM DIDÁTICA EXPERIMENTAL**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Coordenação do Curso de
Licenciatura em Física do Campus
Agreste da Universidade Federal de
Pernambuco – UFPE, na modalidade de
MONOGRAFIA, como requisito parcial
para a obtenção do título de
LICENCIADO(A) EM FÍSICA.

Aprovada em: 15/08/2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. João Francisco Liberato de Freitas (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Sergio de Lemos Campello (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Gustavo Camelo Neto (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Dedico este trabalho à minha família, que sempre me apoiou ao longo desta jornada.

AGRADECIMENTOS

A realização deste Trabalho de Conclusão de Curso representa uma etapa marcante da minha trajetória acadêmica. Chegar até aqui não teria sido possível sem o apoio de muitas pessoas, às quais dedico minha mais sincera gratidão.

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, por me conceder força, saúde e sabedoria ao longo dessa caminhada.

Sou imensamente grato à minha família. Aos meus pais, Antonio Júlio dos Santos e Maria Claudete da Silva, e aos meus irmãos, Bruna Rafaela Santos da Silva, Aline Daniele dos Santos Silva Nunes e Antonio Felipe dos Santos Silva, agradeço pelo amor incondicional, pela paciência, pelo apoio constante e por acreditarem em mim em todos os momentos. A presença de vocês deu sentido a cada conquista.

Ao meu orientador, Prof. Dr. João Francisco Liberato de Freitas, registro meu profundo agradecimento pela orientação atenta, pela dedicação e pelas contribuições valiosas durante todas as etapas deste trabalho. Seu apoio foi essencial para o meu desenvolvimento acadêmico e pessoal.

Aos amigos de graduação, Tiago Francisco, José Guilherme, Erick Vinicius e Eduarda Beatriz, meu muito obrigado pela parceria, pelas conversas e pelos momentos compartilhados. Vocês tornaram essa jornada mais leve e enriquecedora. Agradeço especialmente a Tiago e Guilherme, que acompanharam de perto o desenvolvimento do primeiro protótipo para a disciplina de Física Experimental II, que originou o objeto de estudo deste trabalho.

Meu agradecimento também vai para Mayran, Adriani e Norma, por ouvirem com paciência as reflexões e desafios enfrentados ao longo do percurso. De modo especial, sou grato à Adriani, que, neste último ano, acompanhou de perto minhas análises e tentativas de aprimorar o experimento, sempre presente na pequena, porém acolhedora sala dos estagiários da Escola José Laurentino.

Aos professores do curso de Física - Licenciatura, expresso minha gratidão pelo conhecimento transmitido, pelos desafios propostos e pelo exemplo constante de profissionalismo e dedicação ao ensino.

Por fim, estendo meu agradecimento a todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram para a concretização deste trabalho.

"O experimento é o único juiz da 'verdade' científica." (Feynman et al., 2008, v. 1, cap. 1.)

RESUMO

Os experimentos têm se tornado cada vez mais relevantes no ensino de Física e de outras ciências, pois os discentes buscam, atualmente, um papel mais ativo nas atividades desenvolvidas no ambiente escolar. Nesse contexto, as aulas de laboratório têm ganhado destaque em relação à metodologia convencional baseada em quadro e lápis. Além disso, a experimentação sempre foi um recurso eficaz para despertar o interesse dos alunos na aprendizagem da Física, bem como para facilitar a compreensão dos conteúdos dessa disciplina. Diante disso, este trabalho aborda a construção de um experimento interdisciplinar com potencialidade de utilização em diversos contextos de ensino, como por exemplo: termodinâmica, mecânica ondulatória, propriedades acústicas, programação e utilização de interfaces de controle e automação. O experimento consiste na medição da variação da velocidade do som no ar, a pressão constante, para diferentes temperaturas. O aparato experimental foi desenvolvido com base na plataforma Arduino, devido à sua versatilidade para diversas aplicações. Foram utilizados dois sensores: o HC-SR04, responsável pela medição de pulsos ultrassônicos, e o termopar tipo K acoplado ao módulo MAX6675, empregado na medição da temperatura. Por meio da análise dos dados obtidos, busca-se verificar a concordância entre os resultados experimentais e a teoria de propagação das ondas sonoras. Os testes realizados demonstraram que o experimento foi eficaz na reprodução dos resultados esperados teoricamente, embora tenham sido observadas algumas flutuações em determinados valores de temperatura. Dessa forma, considerando seu grau de confiabilidade e seu baixo custo de produção, o experimento se apresenta como uma ferramenta relevante para enriquecer o ensino sobre ondas sonoras.

Palavras-chave: experimento; ondas; velocidade do som; temperatura; Arduino; HC-SR04.

ABSTRACT

Experiments have become increasingly relevant in the teaching of Physics and other sciences, as students currently seek a more active role in activities carried out within the school environment. In this context, laboratory classes have gained prominence compared to the conventional methodology based on chalk-and-board instruction. Furthermore, experimentation has always been an effective resource for awakening students' interest in learning Physics, as well as for facilitating the understanding of its contents. In light of this, the present work addresses the construction of an interdisciplinary experiment with potential for use in various educational contexts, such as thermodynamics, wave mechanics, acoustic properties, programming, and the application of control and automation interfaces. The experiment consists of measuring the variation in the speed of sound in air, at constant pressure, for different temperatures. The experimental apparatus was developed based on the Arduino platform, due to its versatility for various applications. Two sensors were employed: the HC-SR04, responsible for measuring ultrasonic pulses, and a type-K thermocouple coupled to the MAX6675 module, used for temperature measurement. Through the analysis of the obtained data, the aim is to verify the agreement between the experimental results and the theory of sound wave propagation. The tests carried out demonstrated that the experiment was effective in reproducing the theoretically expected results, although some fluctuations were observed at certain temperature values. Therefore, considering its degree of reliability and low production cost, the experiment stands out as a valuable tool for enriching the teaching of sound waves.

Keywords: experiment; waves; speed of sound; temperature; Arduino; HC-SR04.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 –	As grandezas da ondulatória	16
Figura 2 –	Propagação da onda sonora	17
Figura 3 –	Deslocamento do ar e a variação do seu volume	19
Figura 4 –	As pressões sobre a porção de ar	21
Figura 5 –	Sensor HC-SR04	26
Figura 6 –	Funcionamento do sensor HC-SR04	27
Figura 7 –	Módulo MAX6675 com o termopar tipo K	28
Figura 8 –	Estrutura do experimento	28
Figura 9 –	Arduino UNO e sensores	29
Figura 10 –	Suporte com caps para posicionamento e estabilização do emissor e receptor	29
Figura 11 –	Fabricação do tubo	30
Figura 12 –	Aparato experimental	30
Figura 13 –	Propagação do pulso ultrassônico no interior do tubo	31
Gráfico 1 –	Distribuição dos tempos de percurso	32
Gráfico 2 –	Influência de pequenas variações no tempo de propagação na medição de distância a 20 °C	33
Gráfico 3 –	Influência de pequenas variações no tempo de propagação na medição de velocidade a 20 °C	34
Gráfico 4 –	Relação da velocidade com a raiz da temperatura	38
Gráfico 5 –	Aproximação do gráfico 3 para o intervalo de temperatura analisado	39
Gráfico 6 –	Relação linear da velocidade com a raiz da temperatura	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Medida da velocidade do som para a temperatura ambiente	36
Tabela 2 –	Medidas da velocidade do som correspondentes às temperaturas	37
Tabela 3 –	Comparação entre as medidas teórica e experimental	40

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1	ONDAS E SUAS CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTAIS.....	15
2.2	MATEMÁTICA DAS ONDAS: A EQUAÇÃO DE ONDA.....	17
3	METODOLOGIA.....	26
3.1	CONSTRUÇÃO DO APARATO EXPERIMENTAL.....	26
3.2	IMPLICAÇÕES DO USO DO HC-SR04 EM UM TUBO.....	31
3.3	FILTRO DIGITAL EMPÍRICO.....	34
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	36
4.1	DADOS EXPERIMENTAIS E PROPAGAÇÃO DE INCERTEZAS...	36
4.2	ANÁLISE ESTATÍSTICA E REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS DADOS.....	37
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	41
	REFERÊNCIAS.....	42
	APÊNDICE A – LISTA DOS MATERIAIS UTILIZADOS PARA O DESENVOLVIMENTO DO ARRANJO EXPERIMENTAL.....	44
	APÊNDICE B – CÓDIGO EM C DESENVOLVIDO COM O AUXÍLIO DO CHATGPT PARA REALIZAR AS MEDIÇÕES DE VELOCIDADE E TEMPERATURA.....	45

1 INTRODUÇÃO

A Física, desde seu surgimento na Grécia antiga até sua culminância como uma ciência moderna, passou por um processo de metamorfose, sendo este o resultado de diversos estudos e sistematizações do conhecimento. Aristóteles foi um dos primeiros a elaborar e organizar os conhecimentos de sua época acerca dos fenômenos da natureza, levando em consideração a racionalidade em oposição ao misticismo. A física aristotélica é uma teoria complexa fundamentada na metafísica, sendo esta uma corrente filosófica que tinha por objetivo descrever o “ser”.

Essa concepção acerca da natureza manteve-se por quase dois milênios, sobretudo por parecer coerente com as experiências cotidianas. Um de seus pilares era a defesa da imobilidade da Terra, sustentada pelo argumento de que objetos “desvinculados” da superfície terrestre não acompanhariam o movimento do planeta. Assim, por exemplo, acreditava-se que uma pedra solta do alto de uma torre deveria cair em um ponto afastado da base. Contudo, a partir da formulação da relatividade galileana, demonstrou-se que a pedra e a Terra compartilham o mesmo referencial de movimento, de modo que o corpo em queda livre atinge exatamente a base da torre.

Desta forma, essa e outras ideias foram progressivamente substituídas pelas de Nicolau Copérnico e Galileu Galilei. Isto se deve ao fato de que esse pensamento sobre a natureza é marcado por um caráter qualitativo, distinto da abordagem defendida por Galileu e seus contemporâneos. Como ressalta Porto (2010), “a nova física (...) adquiriu uma feição completamente distinta da ciência aristotélica: pela adoção da linguagem matemática, passou a constituir uma forma quantitativa de conhecimento”.

Essa guinada de uma ciência puramente filosófica e especulativa para uma matematizada e experimental (método científico), proporcionou uma ressignificação das “verdades absolutas”, deixando de serem atribuídas a homens (por meio do argumento de autoridade) para se tornarem resultados de um trabalho científico.

A revolução científica do século XVII foi protagonizada pela ascensão do método científico, que visa a práxis (ação) ao invés da apreciação da natureza. Galileu se destacou como um dos seus pioneiros, utilizando-a para desenvolver diversos conhecimentos, como a lei de queda dos corpos, o princípio da inércia, a relatividade galileana etc.

No artigo *Galileu e a ciência moderna*, Mariconda (2006), caracteriza o método científico como “a procura, na natureza, de regularidades matematicamente expressáveis, as chamadas leis da natureza, e o método de certificar-se de sua verdade através da realização de experimentos”. Portanto, a combinação da matemática e da experimentação trouxe consigo as chamadas grandezas físicas, que são os resultados de medições utilizando-se os instrumentos científicos. O uso desses instrumentos confere ao ser humano uma ampliação dos seus sentidos, ou seja, suprimindo a limitação biológica e tornando mais sensível a percepção dos fenômenos da natureza.

Assim, a Física como uma ciência fundamentada no método científico, foi norteadada por experimentos e observações, desde Galileu, passando por Kepler e culminando em Newton. As leis ou teorias elaboradas eram todas empíricas, porém no final do século XIX e meados do século XX, a física teórica ganhou notoriedade em virtude das teorias da relatividade e da mecânica quântica. Apesar que para as suas admissões, experimentos foram realizados com o intuito de comprová-las. Desta forma, a experimentação desempenha um papel fundamental no desenvolvimento da ciência, tornando-se ainda mais relevante quando integrada à educação. Portanto, dentre as diversas metodologias disponíveis, destaca-se o uso de laboratórios, onde os discentes podem aplicar, na prática, os conceitos teóricos adquiridos.

A motivação para este trabalho surgiu a partir de um projeto-piloto desenvolvido como uma das atividades da disciplina de Física Experimental II, do curso de Licenciatura em Física da Universidade Federal de Pernambuco - Campus do Agreste. A proposta consistia na elaboração de um experimento de física acompanhado de um relatório. Assim, foi elaborado um aparato experimental com o objetivo específico de verificar a teoria da propagação de ondas sonoras no ar, explorando a relação de proporcionalidade entre a velocidade do som e a raiz quadrada da temperatura. Cabe-nos ressaltar que, apesar do objetivo se manter fiel ao longo do trabalho (relações entre velocidade do som e temperatura), este dispositivo tem uma diversidade de aplicações interdisciplinares no ensino. Este conhecimento interdisciplinar, será abordado de forma detalhada ao longo do texto como fases necessárias para a motivação inicial, porém, pode-se fazer abordagens em que estas fases sejam o ponto de partida e dar um novo significado ao experimento.

Embora os objetivos geral e específicos tenham sido mantidos, algumas modificações foram feitas no aparato experimental. A principal alteração ocorreu no sistema de medição e recepção das ondas sonoras: inicialmente, o som era produzido por palmas, e a detecção era realizada por dois microfones de eletreto conectados a um osciloscópio, posicionados a uma distância fixa entre si. Apesar da utilização do osciloscópio, os dados coletados apresentaram discrepâncias em relação à teoria da propagação das ondas sonoras.

Diante disso, foi desenvolvido um novo equipamento, visando minimizar erros indesejáveis e aprimorar a precisão das medições. Portanto, o objetivo geral deste trabalho é a elaboração de um arranjo experimental capaz de constatar a influência da temperatura na propagação das ondas sonoras no ar.

Nesse contexto, a relevância acadêmica desta pesquisa está na sua aplicabilidade no ensino de física, abrangendo temas como ondulatória e termodinâmica. Além disso, por se tratar de um material de baixo custo, sua reprodutibilidade é facilitada, tornando-o uma ferramenta acessível para o ensino.

Este trabalho foi organizado em cinco seções que são:

- 1) **Introdução:** é relatado a importância da experimentação para a ciência, e a sua contribuição para o ensino de física. Além de ser apresentado o tipo de pesquisa e o objetivo deste trabalho.
- 2) **Revisão bibliográfica:** dividida em duas subseções. A primeira discute a definição das ondas e suas características, já na segunda é apresentado o desenvolvimento para se chegar na equação de onda para o som e a sua solução para o caso adiabático.
- 3) **Metodologia:** é apresentada a elaboração do aparato experimental e os sensores utilizados, bem como as implicações do uso do sensor HC-SR04 em um tubo e os procedimentos adotados para a obtenção dos dados.
- 4) **Resultados e discussões:** são expostos os dados experimentais, assim como a análise de um conjunto de amostras com o objetivo de avaliar a eficiência do experimento e sua aplicabilidade no ensino de física.
- 5) **Considerações finais:** são relatadas as dificuldades encontradas no processo experimental e os meios utilizados para superá-las. Adicionalmente, são apresentadas sugestões de possíveis modificações no aparato experimental.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será discutido a definição de onda, as suas grandezas, assim como as diversas formas de propagação. Em seguida, será demonstrado matematicamente a equação de onda para o som, e sua solução para o caso de uma transformação adiabática.

2.1 ONDAS E SUAS CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTAIS

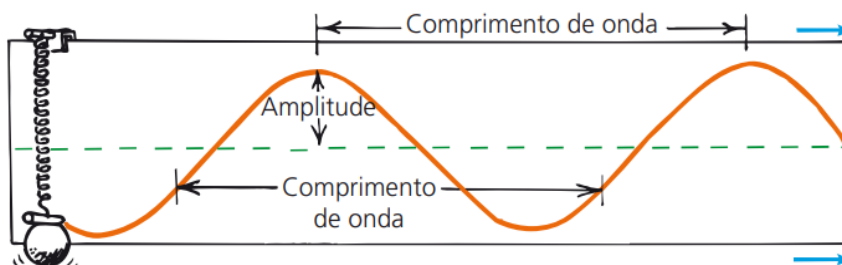
As ondas são entes físicos relacionados ao transporte de energia de um ponto do espaço para outro, isso ocorre devido a perturbações ou oscilações de um sistema físico no espaço e no tempo.

A física ondulatória, diferentemente da corpuscular, é descrita por grandezas como comprimento de onda, frequência, amplitude e período. Essa diferença decorre do fato de que a onda não possui massa nem uma configuração espacial fixa, manifestando-se como uma perturbação que se propaga em um meio ou no espaço, ao contrário da partícula, que apresenta corpo próprio e limites definidos. Portanto, as equações da cinemática não são diretamente aplicáveis a esse fenômeno. Abaixo seguem as definições dessas grandezas:

- Comprimento de onda (λ): Em uma onda periódica é a distância entre dois pontos consecutivos onde a sua forma se repete, representando uma oscilação completa. Para simplificar, essa medida pode ser feita entre dois pontos de máximo (cristas) ou dois pontos de mínimo (vales) da função que a descreve.
- Período (T): É o tempo necessário para que uma onda, propagando-se com velocidade v , percorra um comprimento de onda. Assim, o período corresponde ao intervalo de tempo necessário para a realização de uma oscilação completa.
- Frequência (f): Representa o número de oscilações que ocorrem por unidade de tempo. Ela é o inverso do período, $f = T^{-1}$.
- Amplitude (A): É a maior distância que os elementos do meio material percorrem a partir da posição de equilíbrio. Em uma corda vibrante, por

exemplo, a amplitude indica o afastamento máximo de suas partículas em relação à posição central.

Figura 1 – As grandezas da ondulatória.



Fonte: Hewitt (2015, p. 359).

Este movimento é descrito matematicamente por meio de funções, nos quais seus argumentos dependem de uma combinação específica envolvendo a posição e o tempo. Para o caso de uma onda progressiva que se desloca com velocidade v e sem mudar de forma ao longo de uma direção, a função é $f(x, t) = f(x \pm vt)$, com o sinal a depender do sentido de propagação. A velocidade v é definida como o produto entre o comprimento de onda e a frequência ($v = \lambda f$), sendo esta uma relação fundamental para as ondas.

As ondas que necessitam de um meio material para se propagar e são governadas pelas Leis de Newton, são ditas mecânicas, alguns exemplos são: som, corda vibrante, ondas sísmicas etc. Um caso particular são as ondas eletromagnéticas que podem se mover no vácuo e são compreendidas através das Equações de Maxwell, um exemplo é a luz visível.

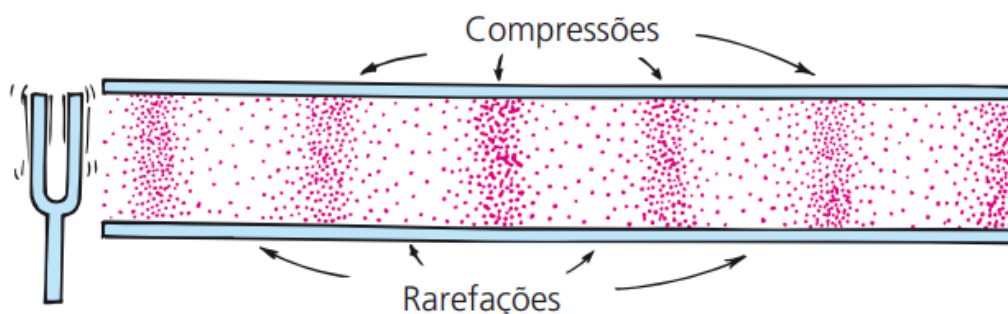
Como resultado da observação deste fenômeno, percebeu-se que as ondas poderiam ser identificadas com base na direção de propagação ao plano de perturbação. Desta forma, elas foram classificadas entre transversais e longitudinais. As ondas transversais possuem direção perpendicular ao plano de perturbação: ondas em uma corda e ondas eletromagnéticas. As ondas longitudinais possuem direção paralela ao plano de perturbação: o som.

O som é uma onda tridimensional, e portanto se propaga em todas as direções. Como já foi relatado acima, esta é uma onda que necessita de um meio para se propagar, podendo ser sólido, líquido ou gasoso. Desta forma, um dos fatores que influenciam seu comportamento é a elasticidade do meio.

Para a existência de uma onda sonora no ar, a variação da pressão é um dos principais fatores, sendo este caracterizado por uma movimentação oscilatória de um objeto no meio. Este movimento deve ser brusco para que esta variação de pressão viaje pelo meio, caso contrário, as moléculas tenderiam a escoar através do objeto, e não existiria onda. Esta condição é destacada no trecho a seguir:

Naturalmente, se o objeto fosse movido suavemente, o ar simplesmente flui em torno dele, mas o que nos interessa é um movimento rápido, de modo que não haja tempo suficiente para tal fluxo. Então, com o movimento, o ar é comprimido e uma variação da pressão é produzida que empurra ainda mais ar. Esse ar é por sua vez comprimido, que produz novamente uma pressão extra, e uma onda é propagada. (Feynman et al., 2008, p. 491)

Figura 2 – Propagação da onda sonora.



Fonte: Hewitt (2015, p. 377).

As ondas possuem importantes fenômenos que são: difração, interferência, reflexão e refração. Para este trabalho, voltaremos nossa atenção para o fenômeno relacionado ao efeito da mudança na direção de propagação da onda ao “encontrar” um obstáculo, sendo este a reflexão.

2.2 MATEMÁTICA DAS ONDAS: A EQUAÇÃO DE ONDA

A descrição matemática está amparada na obra de Feynman et al. (2008), cuja escolha se justifica pela abordagem rigorosa e intuitiva na integração de conceitos físicos e matemáticos.

Para o desenvolvimento da temática, três considerações fundamentais devem ser destacadas: (i) o gás está em constante movimento, o que modifica sua densidade; (ii) a variação da densidade implica em uma variação da pressão; e (iii) as desigualdades de pressão são responsáveis pelo movimento do gás.

Iniciaremos nossa análise com o item II. Então, podemos concluir que a pressão é uma certa função da densidade, tal afirmação é válida para um gás, líquido ou sólido.

Um gás que se encontra em equilíbrio mecânico, possui uma pressão P_0 e a densidade correspondente é ρ_0 . Devido às variações de pressão no ar serem extremamente pequenas se comparadas com o equilíbrio, as mudanças de densidade também são bastante pequenas. Dessa forma, podemos escrever as seguintes relações:

$$P = P_0 + P_e, \quad (1)$$

$$\rho = \rho_0 + \rho_e, \quad (2)$$

sendo P_e e ρ_e variações da pressão e densidade, respectivamente. Como a pressão é função da densidade, $P = f(\rho)$, podemos reescrever a Equação (1) como:

$$\begin{aligned} P &= f(\rho_0 + \rho_e) \Rightarrow \\ P_0 + P_e &= f(\rho_0) + \rho_e \cdot f'(\rho_0). \end{aligned} \quad (3)$$

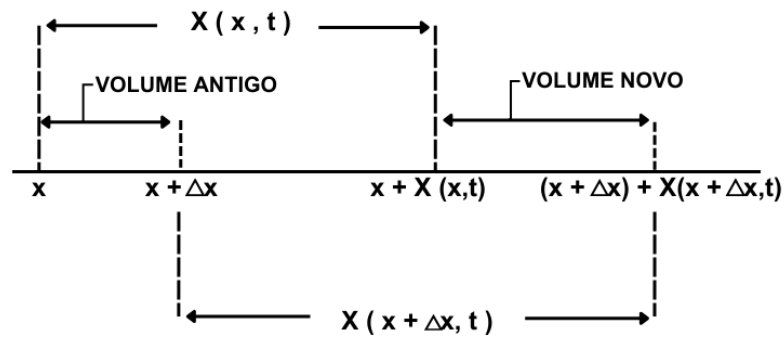
O segundo passo só é válido se P_e e ρ_e são suficientemente pequenas. Podemos deduzir esse resultado através de uma expansão da função $f(\rho_0 + \rho_e)$ em um processo de linearização com série de Taylor por considerarmos pequenas variações de ρ_0 .

Desta maneira, uma consequência da Equação (3), é que o excesso de pressão P_e é proporcional a variação de densidade ρ_e , sendo este fator de proporcionalidade a derivada da pressão com relação a densidade calculada no equilíbrio.

$$f'(\rho_0) = \left(\frac{dP}{d\rho} \right)_{\rho_0}. \quad (4)$$

Agora, partindo para a análise do item I, ou seja, como o deslocamento de um volume de ar entre duas regiões implica uma mudança na densidade. Considerando uma quantidade do ar não perturbado pela onda sonora, localizado entre as posições x e $x + \Delta x$ no instante $t_0 = 0$. Em um instante t posterior após a passagem da onda sonora, as novas posições serão determinadas por uma função $X(x, t)$. Então, o volume de ar estará compreendido entre as posições $x + X(x, t)$ e $(x + \Delta x) + X(x + \Delta x, t)$, como na figura abaixo.

Figura 3 – Deslocamento do ar e a variação do seu volume.



Fonte: Feynman et al. (2008, p. 492).

Sabendo-se que a densidade é proporcional ao volume, e por simplicidade vamos considerar o caso para uma onda plana. Então, podemos tomar uma área unitária e perpendicular à direção x . Desta forma, a porção de ar por unidade de área em Δx , é $\rho_0 \cdot \Delta x$, onde ρ_0 é a densidade do ar não perturbado. Analogamente a densidade no instante t é ρ , e a quantidade de ar por unidade de área é, $\rho \cdot [\Delta x + X(x + \Delta x, t) - X(x, t)]$.

Como estamos considerando que a porção de matéria não é alterada pelo deslocamento da massa de ar, segue a seguinte relação:

$$\rho_0 \cdot \Delta x = \rho \cdot [\Delta x + X(x + \Delta x, t) - X(x, t)]. \quad (5)$$

Dividindo toda a expressão acima por Δx e tomando o limite para Δx tendendo a zero, temos que:

$$\rho_0 = \rho + \rho \cdot \frac{\partial X}{\partial x} . \quad (6)$$

A Equação (6) é uma relação para a densidade no instante t , porém nosso objetivo é encontrar uma solução para a variação da densidade. Para isso, é necessário substituir a Equação (2) na expressão acima, e realizar operações algébricas para obter o resultado abaixo.

$$\rho_e = -\rho_0 \cdot \frac{\partial X}{\partial x} - \rho_e \cdot \frac{\partial X}{\partial x} . \quad (7)$$

No desenvolvimento do item I utilizamos como argumento que a variação da densidade é pequena em torno da densidade no equilíbrio, ou seja $\rho_e \ll \rho_0$, e por consequência $X(x, t)$ é pequeno, assim como a sua derivada parcial em relação à x . Portanto, podemos desprezar o segundo termo do lado direito da Equação (7), ficando com a seguinte relação:

$$\rho_e = -\rho_0 \cdot \frac{\partial X}{\partial x} . \quad (8)$$

A solução acima é aceitável fisicamente, pois se os deslocamentos $X(x, t)$ variam com a posição x , então haverá mudanças na densidade. O sinal negativo também está correto, pois se considerarmos um aumento de $X(x, t)$ com relação a x , que representa uma expansão do ar, e conseqüentemente uma diminuição na densidade.

Agora precisamos analisar o item III, sendo nosso objetivo encontrar uma expressão que descreva como variações de pressão produzem o movimento do ar. Como o som é uma onda mecânica, usaremos tal fato para encontrar a relação entre

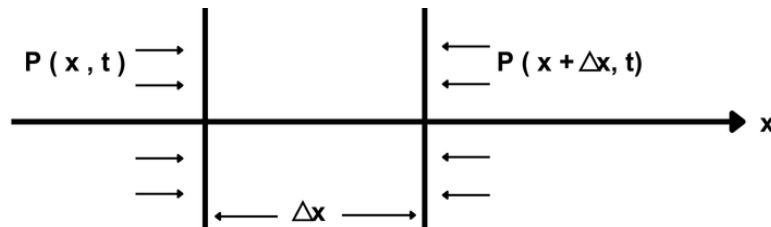
a força resultante e a pressão, e por fim a equação do movimento. Considere novamente a porção de ar não perturbado do item I. Sabemos que os deslocamentos são descritos pela função $X(x, t)$, e que a força resultante é o produto entre a massa e a aceleração. Então, o módulo da força resultante por unidade de área é:

$$\frac{F_{res}}{A} = \rho_0 \cdot \Delta x \cdot \frac{\partial^2 X}{\partial t^2}. \quad (9)$$

Como estamos considerando Δx muito pequeno, não importa se a aceleração é tomada em uma borda ou em alguma posição intermediária da porção de ar.

Na figura abaixo, no ponto x , a força aponta no sentido positivo de x e tem módulo igual a $P(x, t) \cdot A$, já para o ponto $x + \Delta x$, a força está no sentido negativo de x e tem módulo igual a $P(x + \Delta x, t) \cdot A$.

Figura 4 – As pressões sobre a porção de ar.



Fonte: Feynman et al. (2008, p. 493).

A força resultante é definida como o somatório de todas as forças agindo em um sistema, com base nisso, podemos concluir que, a força resultante por unidade de área é

$$\frac{F_{res}}{A} = P(x, t) - P(x + \Delta x, t). \quad (10)$$

Podemos observar que se dividirmos toda a expressão acima por $-\Delta x$, e tomarmos o limite para Δx tendendo a zero, o lado direito se torna a derivada parcial da pressão em relação a x . Já o limite da esquerda pode ser facilmente

compreendido quando substituído a relação da força resultante por unidade área presente na Equação (9), temos que:

$$- \rho_0 \cdot \frac{\partial^2 X}{\partial t^2} = \frac{\partial P}{\partial x} . \quad (11)$$

Como estamos considerando Δx suficientemente pequeno, uma implicação é que uma variação de P está apenas relacionada ao excesso de pressão.

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial P_e}{\partial x} . \quad (12)$$

Substituindo esse resultado na Equação (11), temos a seguinte expressão,

$$- \rho_0 \cdot \frac{\partial^2 X}{\partial t^2} = \frac{\partial P_e}{\partial x} . \quad (13)$$

Utilizando os resultados obtidos nas seguintes Equações (4), (8) e (13), vamos construir uma única expressão que caracteriza os três pontos elencados no início.

Inicialmente vamos eliminar P_e da Equação (13) usando o fato de que as variações infinitesimais da pressão e da densidade estão associadas P_e e ρ_e . Portanto, a derivada parcial de P_e em relação a x é proporcional a derivada parcial de ρ_e , como mostrado na Equação (14).

$$\frac{\partial P_e}{\partial x} = f'(\rho_0) \cdot \frac{\partial \rho_e}{\partial x} . \quad (14)$$

Substituindo a Equação (14) na Equação (13), temos:

$$- \rho_0 \cdot \frac{\partial^2 X}{\partial t^2} = f'(\rho_0) \cdot \frac{\partial \rho_e}{\partial x} . \quad (15)$$

Agora, derivando parcialmente a Equação (8) em relação a x , e substituindo o resultado na Equação (15), temos:

$$\frac{\partial^2 X}{\partial t^2} = f'(\rho_0) \cdot \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} . \quad (16)$$

A expressão acima, é a “equação de onda” para ondas sonoras em uma dimensão. Em que a constante de proporcionalidade é igual ao quadrado da velocidade da onda, $f'(\rho_0) = v^2$. Esta relação pode ser obtida através das segundas derivadas parciais da função que descreve uma onda progressiva com velocidade definida, $f(x \pm vt)$.

Usando a Equação (4), podemos relacionar a velocidade do som com a variação de pressão e de densidade, tomadas no equilíbrio (P_0 e ρ_0). Desta forma, segue a relação:

$$v_{som} = \sqrt{\left(\frac{dP}{d\rho}\right)_{\rho_0}} . \quad (17)$$

Para a Equação (17) foram propostas algumas soluções. Newton foi um dos primeiros a propor uma solução, alegando que no interior do gás ocorria uma transformação isotérmica, ou seja, não havia mudanças de temperatura durante o deslocamento da onda, devido esse movimento ser bastante rápido. No entanto, sua proposição revelou-se inadequada, pois levou a um resultado teórico divergente dos dados experimentais. Posteriormente, Laplace obteve a formulação correta ao propor que o processo termodinâmico envolvido era uma transformação adiabática, na qual não há troca de calor entre as regiões comprimida e rarefeita.

Em uma transformação adiabática, a relação entre a pressão e o volume de um gás permanece constante, como mostrado a seguir:

$$P \cdot V^\gamma = \text{constante} \quad (18)$$

Dispondo da expressão acima, podemos solucionar a Equação (17). Portanto, devemos tomar a sua derivada com relação a densidade, vale ressaltar que a derivada de uma constante é zero. Então, no lado esquerdo da igualdade é aplicado a regra do produto para as derivadas.

$$\begin{aligned} \frac{\partial(P \cdot V^\gamma)}{\partial \rho} &= 0 \Rightarrow \\ \frac{\partial P}{\partial \rho} \cdot V^\gamma + P \cdot \frac{\partial V^\gamma}{\partial \rho} &= 0 \Rightarrow \\ \frac{\partial P}{\partial \rho} &= - \frac{P}{V^\gamma} \cdot \frac{\partial V^\gamma}{\partial \rho} . \end{aligned} \quad (19)$$

Como no lado direito da Equação (19), temos uma derivada parcial em relação a densidade, então, devemos escrever o volume do gás em termos desse parâmetro. Desta forma, substituindo a relação de que o volume é a razão entre a massa e a densidade, e em seguida derivando a expressão, temos:

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial \rho} &= - \frac{P \cdot \rho^\gamma}{m^\gamma} \cdot \frac{\partial(m^\gamma \cdot \rho^{-\gamma})}{\partial \rho} \Rightarrow \\ \frac{\partial P}{\partial \rho} &= \gamma \frac{P}{\rho} . \end{aligned} \quad (20)$$

Substituindo a equação de estado de um gás ideal no lado direito da Equação (20), e também o quociente entre a massa e o número de mols pela massa molar, obtemos que:

$$\frac{\partial P}{\partial \rho} = \gamma \frac{\frac{nRT}{V}}{\frac{m}{V}}$$

$$\frac{\partial P}{\partial \rho} = \frac{\gamma RT}{M} . \quad (21)$$

Por fim, substituindo a Equação (21) na Equação (17), encontramos a expressão da velocidade do som para o caso de uma transformação adiabática.

$$v_{som} = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} . \quad (22)$$

Onde:

- v_{som} = velocidade do som (m/s);
- T = temperatura absoluta;
- M = massa molar ($28,95 \cdot 10^{-3}$ Kg/mol);
- γ = coeficiente adiabático para o ar seco (1,4);
- R = constante universal dos gases (8,314 J/ (K·mol));

Substituindo os valores das constantes mencionadas, obtemos a Equação (23), que será utilizada para a análise dos dados experimentais.

$$v_{som} = 20,05 \cdot \sqrt{T} . \quad (23)$$

3 METODOLOGIA

Este trabalho consiste em uma pesquisa de caráter experimental, cujo objetivo principal é determinar a velocidade de propagação de pulsos sonoros no ar sob diferentes condições de temperatura. Neste capítulo, será descrito o desenvolvimento do arranjo experimental, e a análise detalhada do sensor ultrassônico, com ênfase nas implicações decorrentes de sua utilização no interior de um tubo. A relação completa dos materiais utilizados encontra-se no Apêndice A.

3.1 CONSTRUÇÃO DO APARATO EXPERIMENTAL

Para o desenvolvimento do experimento, utilizou-se a plataforma Arduino, escolhida por sua versatilidade e pela precisão no processamento de sinais. Essa plataforma é constituída por um microcontrolador e por um ambiente de desenvolvimento integrado (Arduino IDE).

O Arduino IDE atua como um intermediário de comunicação entre a placa Arduino, os sensores e o programador, possibilitando o envio de comandos para controlar os sensores conectados. O código foi desenvolvido com o auxílio do ChatGPT, uma decisão tomada para otimizar o tempo de desenvolvimento. O código está disponível no Apêndice B.

Na configuração do arranjo experimental, o HC-SR04 desempenha um papel fundamental devido à sua geometria e ao princípio de operação baseado no fenômeno da reflexão do som. O sensor é composto por quatro componentes básicos: transdutor T (emissor), transdutor R (receptor), pinos de comunicação e uma placa para o processamento das informações. Os pinos de comunicação são o elo entre o sensor e o Arduino, sendo eles: *Vcc*, *Trig*, *Echo* e *Gnd*.

Figura 5 – Sensor HC-SR04.

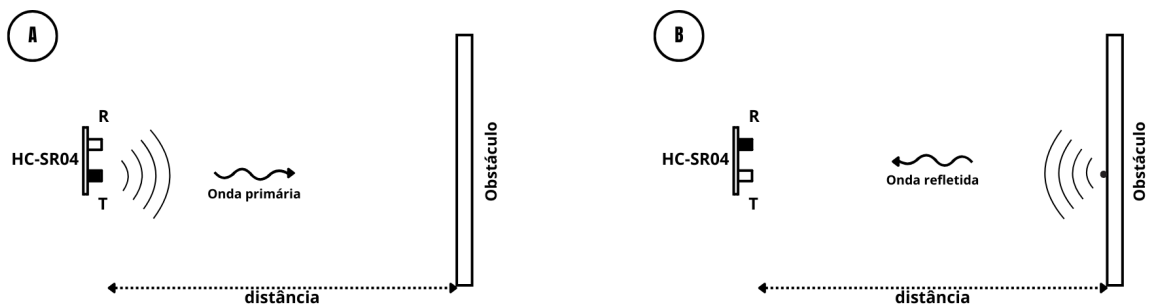


Fonte: Mega Smart (2025).

O funcionamento do sensor baseia-se na emissão e recepção de sinais ultrassônicos. A emissão ocorre após um comando via Arduino IDE alterar o estado da porta digital em que o pino *Trig* se encontra, de 0 V (LOW) para 5 V (HIGH), por 10 μ s. Dessa forma, o transmissor emite um trem de 8 pulsos a uma frequência de 40 kHz, como mostrado na Figura 6-A. Em seguida, a onda ultrassônica é refletida por um obstáculo. Já na Figura 6-B é ilustrada a onda refletida que será detectada pelo receptor, e quando isso ocorrer o pino *Echo* altera seu estado de 0 V (LOW) para 5 V (HIGH). O tempo decorrido entre a emissão e a recepção é medido pelo Arduino através da função *pulseIn()*. Esse tempo é proporcional à distância percorrida pela onda, sendo esta obtida a partir da Equação (24).

$$distância_{(ida+volta)} = velocidade \times tempo. \quad (24)$$

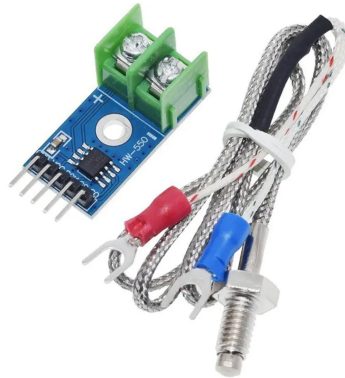
Figura 6 – Funcionamento do sensor HC-SR04.



Este sensor é amplamente utilizado em projetos de robótica devido ao seu baixo custo e alta precisão. As medições do sensor estão dentro de um intervalo de 2 cm a 400 cm, com uma precisão de 0,3 cm.

O termopar tipo K é um sensor de temperatura que funciona com base no efeito termoelétrico, observado na junção de dois fios de metais diferentes. Quando essa junção é aquecida, gera-se uma diferença de potencial (ddp) nas extremidades opostas. Essa variação de tensão pode ser correlacionada com a temperatura, permitindo sua medição de forma precisa e confiável. Para realizar essa medição é necessário o uso do módulo MAX6675, que converte essa diferença de potencial em sinais elétricos e os envia para o Arduino. Este equipamento possui uma faixa de medição de 0 °C a 85 °C, com uma resolução de 0,25 °C.

Figura 7 – Módulo MAX6675 com o termopar tipo K.



Fonte: Casa da Robótica (2025).

A estrutura do novo arranjo experimental consiste em uma caixa de madeira e um tubo cilíndrico transparente de uma lâmpada tubular LED. A caixa e sua tampa possuem as seguintes dimensões: 26,5 cm x 7 cm x 13,5 cm e 26,5 cm x 7 cm x 1 cm, respectivamente. Na tampa, foram fixadas duas cantoneiras em L, nas quais foram presas abraçadeiras. Além disso, foram realizados três furos: dois localizados na parte traseira de cada cantoneira e um entre elas. Para garantir a fixação da tampa à caixa, utilizou-se dobradiças.

No interior da caixa, foram posicionados um Arduino, um sensor ultrassônico HC-SR04 e um módulo MAX6675. Para permitir a conexão do cabo USB ao Arduino, foi feita uma abertura na parte traseira da caixa.

Figura 8 – Estrutura do experimento.

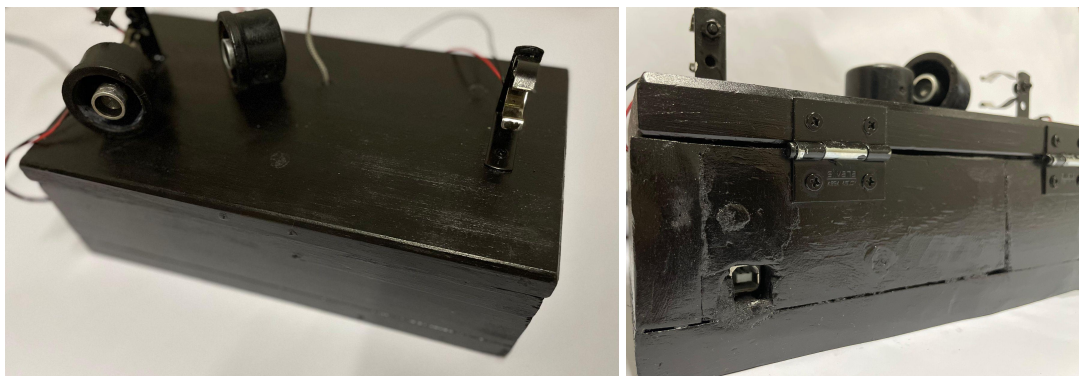
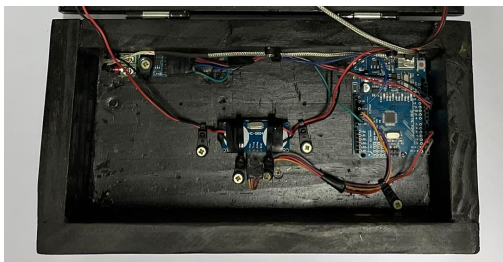


Figura 9 – Arduino UNO e sensores..



O sensor ultrassônico HC-SR04 passou por algumas modificações. Os módulos emissor e receptor foram removidos da placa com o auxílio de um ferro de solda. Em seus terminais, foram fixados fios de cobre de 70 cm de comprimento. A fim de manter o emissor e o receptor firmemente posicionados e evitar movimentações indesejadas durante a experimentação, foram utilizados dois caps com diâmetro ligeiramente superior ao do tubo. Cada cap recebeu três furos: o primeiro destinado à passagem dos fios de cobre; o segundo, próximo ao primeiro, para equalizar a pressão interna com a pressão externa; e o terceiro, localizado na parte traseira do cap, permitiu a fixação de um pedaço de madeira de 2 cm, o qual facilitou a centralização dos sensores. Em seguida, os fios foram conduzidos pelos furos na parte traseira das cantoneiras e reconectados à placa do sensor HC-SR04.

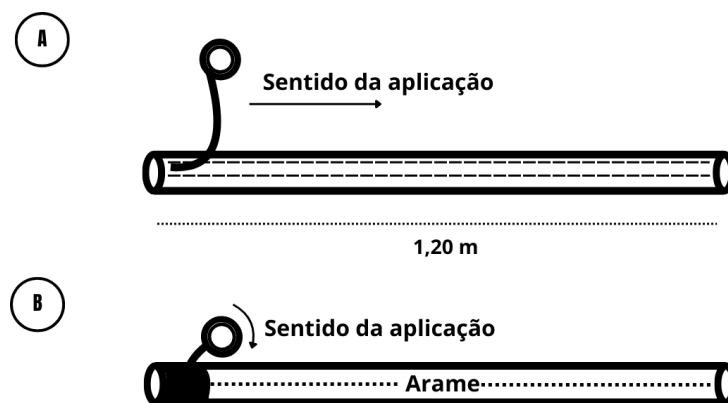
Figura 10 – Suporte com caps para posicionamento e estabilização do emissor e receptor.



O tubo cilíndrico, por ser feito de um vidro bastante fino e, conseqüentemente, frágil, precisou de reforços estruturais antes da realização de qualquer procedimento. Para minimizar os custos do projeto, foram utilizados arame galvanizado e fita adesiva isolante. A fita adesiva impede que ele se estilhace caso sofra micro-rachaduras, enquanto o arame reforça a estrutura, evitando que se parta durante o manuseio.

O processo de fabricação do tubo a partir da lâmpada começou com a remoção dos soquetes e do circuito elétrico. No entanto, a fita de LED foi mantida, pois sua remoção era complexa e não influenciava no projeto. Em seguida, a fita adesiva foi aplicada ao longo de toda a sua extensão, como mostrado na Figura 11-A. Após essa etapa, quatro arames foram fixados na mesma orientação. Depois, com os arames já fixados, a fita foi enrolada 4 vezes, envolvendo toda a estrutura e garantindo maior firmeza, como mostrado na Figura 11-B.

Figura 11 – Fabricação do tubo.



Para viabilizar a instalação dos componentes internos, foram feitas três perfurações no tubo: duas a 5,5 cm de cada extremidade e uma terceira no centro. A perfuração central serviu para posicionar o sensor de temperatura no interior, enquanto as duas outras foram utilizadas para fixar uma resistência de aproximadamente 1,06 m de comprimento, presa com terminais anelares.

Após a montagem dos componentes do experimento, o tubo é fixado nas cantoneiras. Em seguida, os caps são conectados.

Figura 12 – Aparato experimental.



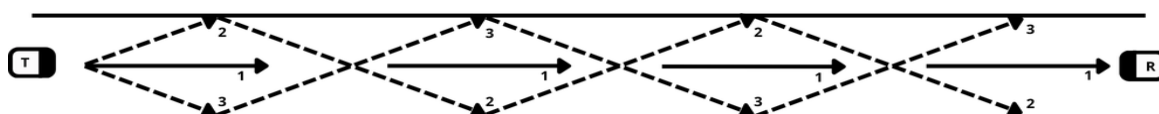
3.2 IMPLICAÇÕES DO USO DO HC-SR04 EM UM TUBO

As ondas sonoras que se propagam dentro de um tubo fechado em ambas as extremidades apresentam comportamentos típicos, como reflexões múltiplas e interferências, que podem alterar a forma do sinal que chega ao receptor em comparação a um meio não confinado.

A escolha do tubo como parte do experimento foi motivada por dois fatores principais. Primeiramente, o seu diâmetro é ligeiramente maior que o dos transdutores do sensor ultrassônico, o que favorece um aquecimento mais uniforme do ar em seu interior. Isso ocorre porque a quantidade de ar confinada é relativamente pequena, tornando-se mais sensível a variações de temperatura. Em segundo lugar, o comprimento do tubo proporciona um maior tempo de percurso da onda sonora, o que contribui para medições mais precisas do tempo de propagação.

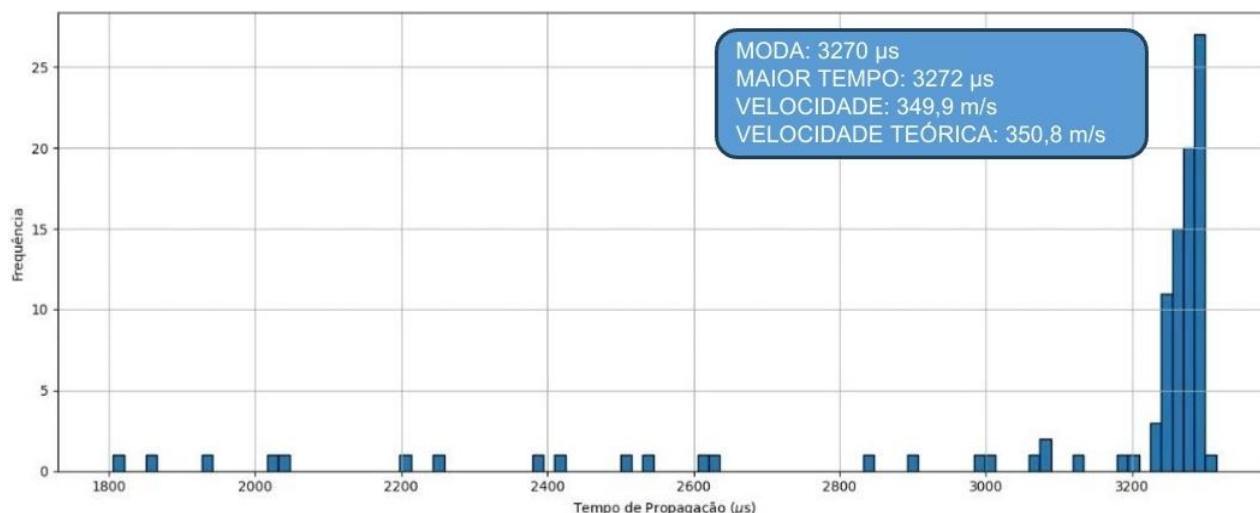
Nesse contexto, é esperado que a propagação e a detecção da onda sonora dentro do tubo ocorra da seguinte maneira: a onda é inicialmente emitida, gerando múltiplas frentes de onda. A frente de onda 1 se propaga diretamente até o receptor, sem sofrer reflexões. Já as frentes de onda 2 e 3, por exemplo, sofrem reflexões nas paredes internas do tubo antes de atingirem o receptor. Como resultado, a frente de onda 1 é a primeira a ser detectada, pois percorre o trajeto mais curto e, portanto, apresenta o menor tempo de propagação.

Figura 13 – Propagação do pulso ultrassônico no interior do tubo.



Porém, durante a experimentação, verificou-se que, para as temperaturas analisadas, as velocidades medidas utilizando os menores tempo de percurso apresentavam divergências em relação aos valores teóricos esperados. Para investigar melhor esse comportamento no interior do tubo, foi elaborado um histograma para cada temperatura. A seguir, apresenta-se o correspondente à temperatura de 33 °C.

Gráfico 1 – Distribuição dos tempos de percurso.



A partir dessa distribuição, observa-se que os valores associados à velocidade do som concentram-se em uma região correspondente aos maiores tempos de percurso, enquanto as demais ocorrências podem ser interpretadas como erros aleatórios. Assim, para a obtenção dos dados apresentados nas Tabelas 1 e 2, tornou-se necessário um estudo detalhado do processo de detecção do sensor ultrassônico, a fim de estabelecer uma solução fundamentada em procedimentos estatísticos que minimizem as fontes de erro.

O uso do sensor HC-SR04 dentro de um tubo apresenta desafios particulares, pois o dispositivo foi originalmente projetado para operar em ambientes abertos, onde há menor incidência de reflexões múltiplas. Ademais, o sensor é voltado para a medição de distância, e não para a determinação direta da velocidade do som.

Esses desafios estão relacionados, principalmente, à forma como o sensor detecta o pulso, o que pode levar a leituras imprecisas ou instáveis quando há reflexões e interferências acústicas. A seguir, são descritas as etapas do processo de detecção do HC-SR04.

Após a chegada do pulso ultrassônico ao transdutor receptor, inicia-se a determinação do tempo de propagação. Inicialmente o som é convertido em um sinal elétrico, que passa por três etapas dentro do circuito do sensor. Primeiro, o sinal de baixa amplitude é amplificado, para que possa ser processado com mais precisão. Em seguida, ele passa por um filtro passa-banda, que deixa passar apenas as frequências próximas da emissão original, em torno de 40 kHz. Por fim, o sinal filtrado é analisado por um circuito que verifica se a amplitude ultrapassa um valor

limite. Quando isso acontece, o sensor entende que um pulso válido foi detectado. Nesse momento, o pino *Echo*, que estava em nível alto desde o início da contagem, é levado para nível baixo, sinalizando o fim da determinação do tempo.

Portanto, o tempo medido pelo sensor nem sempre corresponde exatamente ao instante em que o pulso sonoro atinge o receptor. Isso ocorre porque o circuito interno precisa de um intervalo adicional, da ordem de microssegundos, para validar o sinal recebido, o que pode introduzir variações na medida.

Essas variações tornam-se mais evidentes na determinação da velocidade do que na da distância. Isso ocorre porque a relação entre velocidade e tempo é descrita por uma curva hiperbólica, uma vez que a velocidade é inversamente proporcional ao tempo de percurso.

Para ilustrar esse comportamento de maneira mais clara, apresentam-se a seguir dois gráficos. Em cada curva foram destacados dois pontos específicos, correspondentes a tempos distintos, para os quais se calcularam as distâncias e as velocidades associadas, permitindo uma comparação direta entre as grandezas.

Gráfico 2 – Influência de pequenas variações no tempo de propagação na medição de distância a 20 °C.

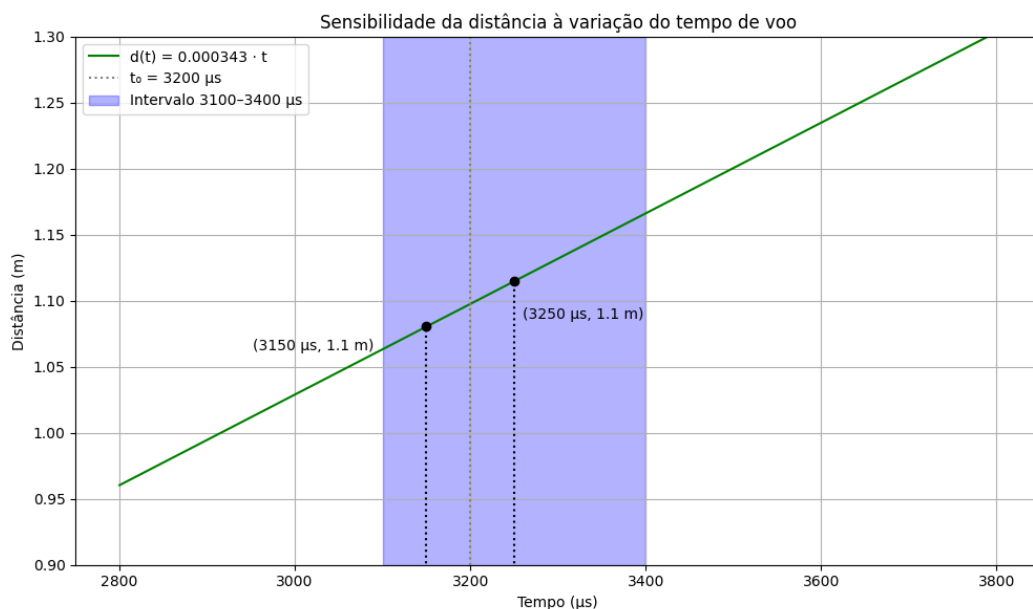
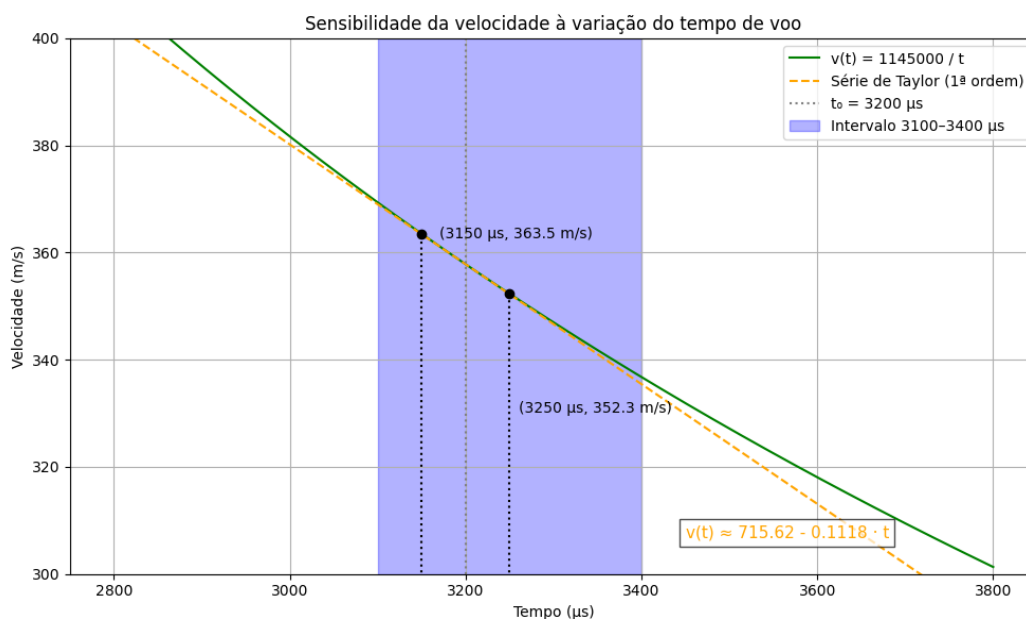


Gráfico 3 – Influência de pequenas variações no tempo de propagação na medição de velocidade a 20 °C.



A interpretação dos gráficos demonstra que variações sutis no tempo de percurso implicam alterações desprezíveis na distância, porém acarretam variações substancialmente mais relevantes na velocidade. Nesse contexto, torna-se imprescindível a aplicação de filtros digitais, de modo a mitigar os efeitos dos erros nas estimativas de velocidade.

3.3 FILTRO DIGITAL EMPÍRICO

Devido ao fato de o sensor ser um dispositivo do tipo *plug-and-play*, não é possível ajustar parâmetros internos, como a frequência de operação, a amplitude do sinal ou a largura de banda do filtro passa-banda. Assim, a alternativa mais adequada para contornar essas limitações consiste na utilização de um filtro digital, desenvolvido a partir de observações empíricas e das características específicas do experimento.

Portanto, as medições da velocidade do som foram conduzidas da seguinte maneira: inicialmente, foram realizadas 10.000 medidas, divididas em 10 blocos com aproximadamente 1.000 amostras cada. As amostras de cada bloco foram coletadas em intervalos de 20 ms, considerando-se apenas aquelas cujo tempo de propagação estava no intervalo de 3100 μs a 3400 μs. Este intervalo foi definido com base nas

medidas esperadas para a velocidade do som no ar, considerando temperaturas entre 10°C e 66°C .

Para cada amostra, a velocidade do som foi determinada pela razão entre a distância de 114,5 cm que separa os módulos e o respectivo tempo de propagação. Em seguida, foi calculada, a partir da média das 10 menores medidas registradas em cada bloco, a velocidade para uma dada temperatura.

Já para a temperatura foi realizada uma média simples com 100 amostras em um intervalo de 30 s, entre elas. Assim, evitando flutuações indesejadas em torno do valor esperado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho, o aparato experimental foi continuamente aperfeiçoado com o objetivo de aumentar a precisão das medições e assegurar maior conformidade com a teoria da propagação do som no ar.

Neste capítulo, são apresentados os dados coletados com o arranjo experimental, bem como uma análise de sua eficiência por meio de tratamento estatístico e avaliação das incertezas.

4.1 DADOS EXPERIMENTAIS E PROPAGAÇÃO DE INCERTEZAS

Para uma análise criteriosa é fundamental considerar a propagação de incertezas nas medições. Esse é um passo essencial, pois há erros relacionados aos instrumentos de medição. Na Tabela 1 são apresentados os dados experimentais referentes à temperatura ambiente, enquanto na Tabela 2 constam as demais medições realizadas, ambas acompanhadas de suas respectivas incertezas.

As incertezas associadas aos tempos de propagação e às temperaturas foram estimadas a partir das múltiplas repetições do procedimento experimental, sendo, portanto, representadas pelo desvio padrão das medições. Já as incertezas associadas às velocidades foram determinadas por meio da propagação de incertezas Equação (25), a partir das incertezas individuais de tempo e distância.

Por fim, a incerteza da distância entre os sensores ultrassônicos foi determinada como 0,05 cm, pois o instrumento utilizado foi uma fita métrica. Nesses casos, a incerteza é obtida considerando metade da menor resolução do instrumento analógico, sendo esta 0,1 cm.

$$\left(\frac{\Delta v}{v}\right)^2 = \left(\frac{\Delta d}{d}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t}{t}\right)^2. \quad (25)$$

Tabela 1 – Medida da velocidade do som para a temperatura ambiente.

Velocidade do Som ($v \pm \Delta v$) m/s	Temperatura Ambiente ($T \pm \Delta T$) K
346 ± 2	$298,1 \pm 5 \cdot 10^{-1}$

Tabela 2 – Medidas da velocidade do som correspondentes às temperaturas.

Velocidade do som ($v \pm \Delta v$) m/s	Temperatura ($T \pm \Delta T$) K
347 ± 2	$299,1 \pm 5 \cdot 10^{-1}$
348 ± 2	$300,1 \pm 5 \cdot 10^{-1}$
349 ± 2	$301,1 \pm 5 \cdot 10^{-1}$
350 ± 2	$302,1 \pm 5 \cdot 10^{-1}$
351 ± 2	$303,1 \pm 5 \cdot 10^{-1}$
351 ± 2	$304,1 \pm 5 \cdot 10^{-1}$
351 ± 2	$305,1 \pm 5 \cdot 10^{-1}$
353 ± 2	$307,1 \pm 5 \cdot 10^{-1}$
354 ± 2	$308,1 \pm 5 \cdot 10^{-1}$
353 ± 2	$309,1 \pm 5 \cdot 10^{-1}$
353 ± 2	$311,1 \pm 5 \cdot 10^{-1}$
354 ± 2	$313,1 \pm 5 \cdot 10^{-1}$

4.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA E REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS DADOS

A fim de conferir se os objetivos deste trabalho foram alcançados, foi verificada a confiabilidade do aparato experimental por meio da análise gráfica dos dados das Tabelas 1 e 2 e do erro percentual (Equação 26).

$$E_{\%} = \frac{|V_{medido} - V_{teórico}|}{V_{teórico}} \cdot 100\% . \quad (26)$$

Em uma análise gráfica pode-se aplicar alguns métodos com o intuito de demonstrar se existe uma correlação entre as variáveis analisadas. Um dos métodos

é a regressão linear, que consiste em encontrar a melhor reta que se ajusta a um conjunto de pontos experimentais que possuem entre si uma relação linear. Desta forma, é determinado os coeficientes angular e linear.

Neste trabalho estamos utilizando a Equação (23) como referência da relação entre a velocidade do som e a temperatura, porém esta não é uma equação de reta. Então, é necessário realizar algumas manipulações algébricas a fim de encontrar uma equação do seguinte tipo: $y = ax + b$. Para a equação em questão basta apenas definir uma nova variável que é igual a raiz quadrada da temperatura e considerar o coeficiente linear igual a zero, como apresentado abaixo:

$$Y = A \cdot X . \quad (27)$$

Onde:

- $Y = v_{som}$;
- $X = \sqrt{T}$;
- $A = A_{medido}$
- $A_{teórico} = 20,05 (m/s) \cdot K^{-\frac{1}{2}}$;

Gráfico 4 – Relação da velocidade com a raiz da temperatura.

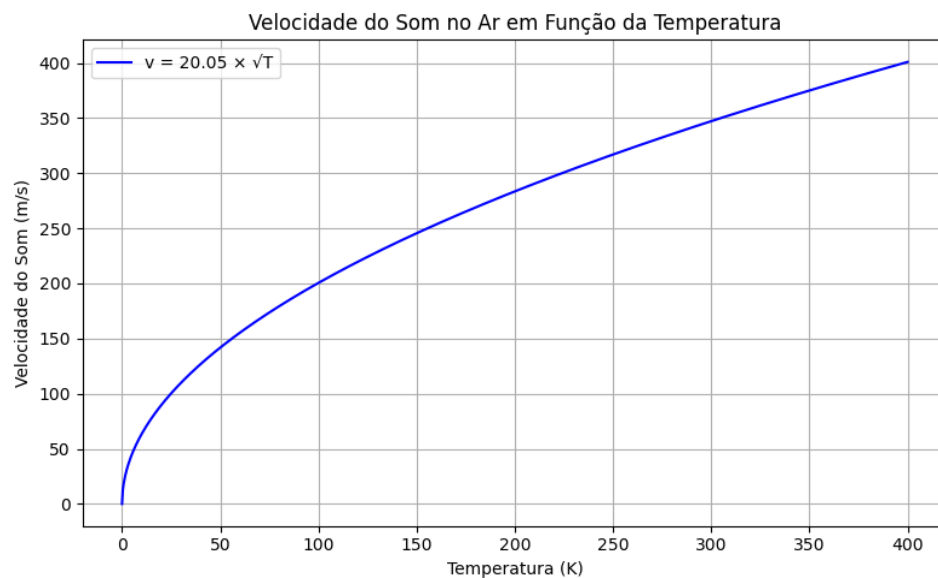
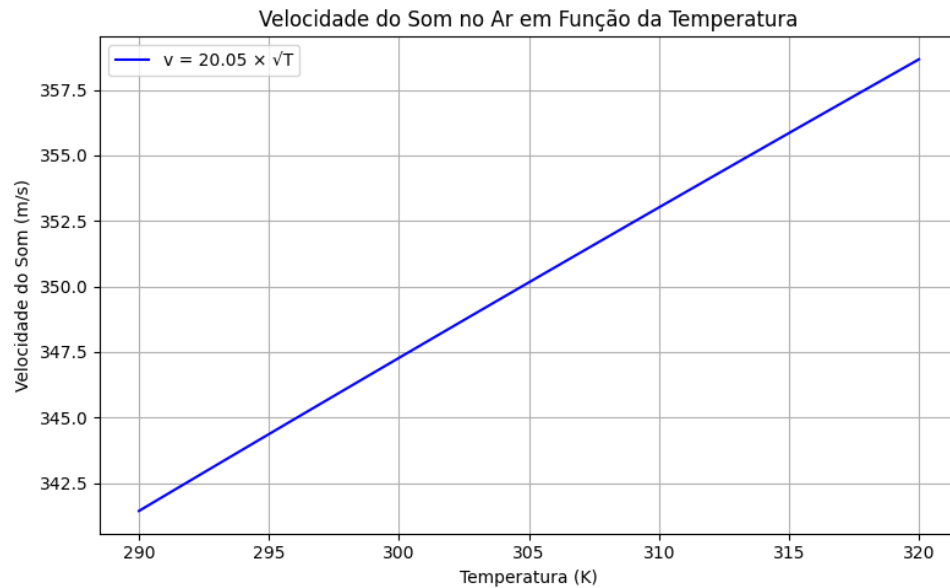
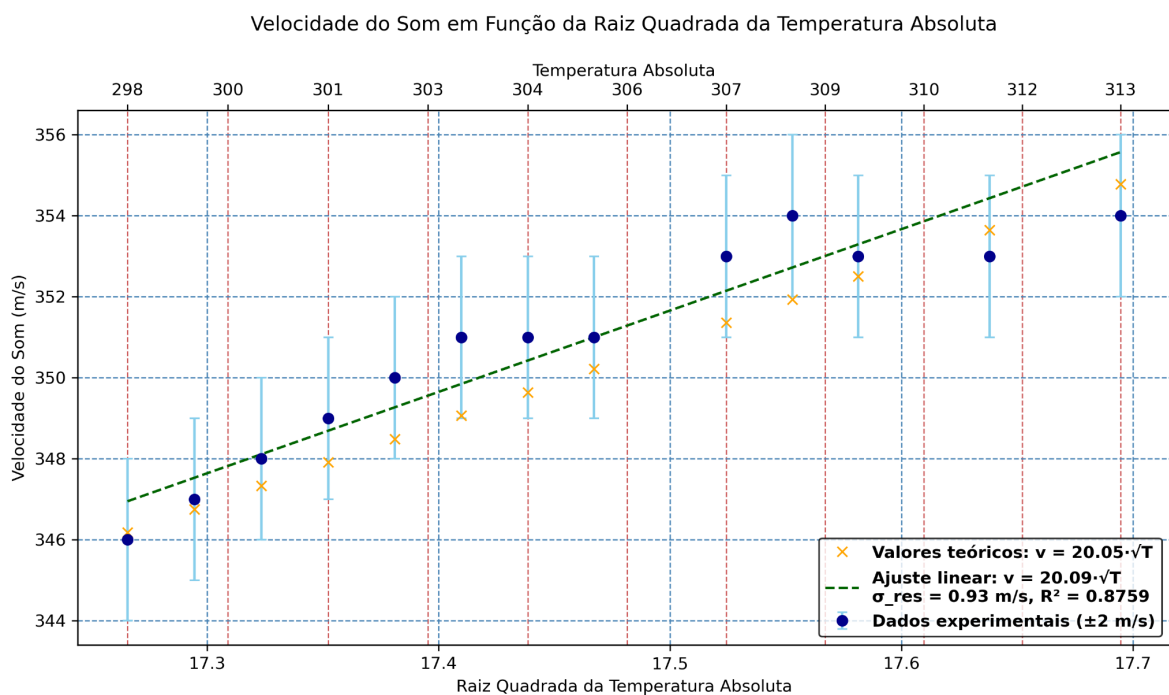


Gráfico 5 – Aproximação do gráfico 3 para o intervalo de temperatura analisado.



Utilizando o Python foi plotado o Gráfico 6 com os dados das Tabelas 1 e 2 ajustados para a Equação (27). Por fim, aplicou-se a regressão linear, com o intuito de obter o valor para A.

Gráfico 6 – Relação linear da velocidade com a raiz da temperatura.



No Gráfico 6, observa-se que a diferença entre os valores teóricos e experimentais é pequena, especialmente considerando a faixa estreita de temperatura analisada. Isso demonstra a existência de uma relação linear entre a velocidade do som e a raiz quadrada da temperatura. O coeficiente de determinação (R^2) foi de aproximadamente 0,88, o que significa que o modelo conseguiu explicar cerca de 88% da variação dos dados experimentais. Esse resultado mostra que o ajuste feito segue bem a tendência esperada. Por outro lado, este coeficiente sozinho não é suficiente para mostrar o quão próximos os dados estão dos valores teóricos. Por isso, também foi analisado o desvio padrão, que ajuda a entender melhor a variação entre os valores medidos e os esperados, que resultou em um valor de aproximadamente 1 m/s. Esse resultado indica que a variação dos dados experimentais em relação ao modelo teórico está dentro da incerteza previamente estabelecida de ± 2 m/s. Os resultados da Tabela 3 se mostraram promissores, com um erro percentual de 0,2%, o que evidencia a capacidade do experimento de reproduzir a situação prevista teoricamente, com uma margem de erro pequena dentro de um certo intervalo de temperatura.

Tabela 3 – Comparação entre as medidas teórica e experimental.

Coeficiente	Teórico	Medido	$E_{\%}$
A	20,05	20,09	0,2%

A diferença observada entre os valores teóricos e experimentais da velocidade do som pode ser atribuída a diversos fatores. Em primeiro lugar, as medições foram realizadas dentro de um intervalo restrito de temperaturas, utilizando-se a média da temperatura interna do tubo como referência. Além disso, foi aplicado um filtro digital empírico com o objetivo de mitigar erros associados ao funcionamento do sensor HC-SR04 em ambiente confinado, como em um tubo, onde múltiplas reflexões e ruídos podem comprometer a precisão das leituras. É importante destacar também que os modelos teóricos se baseiam em condições ideais, como ar seco, pressão atmosférica constante e ausência de turbulências, que nem sempre podem ser reproduzidas com exatidão em um experimento real. Essas discrepâncias, ainda que esperadas, reforçam a necessidade de tratamentos estatísticos e metodológicos adequados para garantir resultados confiáveis.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho possui, em essência, um objetivo geral: o desenvolvimento de um aparato experimental. Além disso, apresenta um objetivo específico: a reprodução das previsões teóricas sobre a propagação do som. O alcance desses objetivos mostrou-se desafiador, como apresentado nas seções anteriores, principalmente devido à necessidade de controlar a temperatura como variável experimental e ao uso do sensor HC-SR04. No entanto, essas e outras dificuldades foram superadas por meio de diversas modificações na estrutura do experimento, bem como por um estudo sistematizado, fundamentado em sucessivas observações do comportamento do aparato em diferentes condições de temperatura. Essas observações possibilitaram identificar padrões, avaliar a influência de variáveis externas e propor ajustes estruturais e metodológicos capazes de minimizar o impacto das múltiplas reflexões e de outros fatores que poderiam comprometer as medições, evitando assim erros significativos.

Apesar dessas limitações, os dados experimentais obtidos demonstram a robustez e a viabilidade do aparato para aplicação em aulas de Física, especialmente em atividades experimentais voltadas ao estudo da propagação do som e da influência da temperatura no meio.

Além disso, o sistema pode ser aperfeiçoado com a substituição do sensor ultrassônico HC-SR04 por dispositivos mais avançados, ou ainda pelo desenvolvimento de uma solução própria. Isso permitiria controlar variáveis fundamentais, como a frequência do pulso emitido, sua amplitude e a largura de banda do filtro passa-banda, fatores essenciais para ampliar os estudos sobre a propagação do som, incluindo a influência de outras variáveis físicas, como a pressão do ar e a composição da atmosfera.

REFERÊNCIAS

- Falcão Jr., Abdoral M. et al. *Observando a influência da temperatura do ar na velocidade de propagação do som com o auxílio de um telêmetro acústico*. Revista Brasileira de Ensino de Física, Rio de Janeiro, v.45, e20230189, 2023. Disponível em: [SciELO Brasil - Observando a influência da temperatura do ar na velocidade de propagação do som com auxílio de um telêmetro acústico](#)
[Observando a influência da temperatura do ar na velocidade de propagação do som com auxílio de um telêmetro acústico](#). Acesso em: 09 abr. 2025.
- Feynman, Richard P.; LEIGHTON, Robert B.; SANDS, Matthew. *Lições de Física de Feynman: Volume 1 – Mecânica, Radiação e Calor*. Traduzido por Editora Bookman. Porto Alegre: Bookman, 2008.
- Hewitt, Paul G. *Física Conceitual*. 12. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.
- Madeira, Daniel. *Termopar tipo K + MAX6675 - Medindo temperatura*. Vida de Silício, [s.l.], 2018. Disponível em: [Termopar tipo K + MAX6675 - Medindo temperatura | Portal Vida de Silício](#). Acesso em: 07 abr. 2025.
- Mariconda, Pablo Rubén. *Galileu e a ciência moderna. Cadernos de Ciências Humanas – Especiaria*, Ilhéus, v. 9, n. 16, p. 267-292, 2006. Disponível em: [Especiaria: Cadernos de Ciências Humanas](#). Acesso em: 09 abr. 2025.
- Mota, Allan. *HC-SR04 - Sensor Ultrassônico de distância com Arduino*. Vida de Silício, [s.l.], 2017. Disponível em: [HC-SR04 - Sensor Ultrassônico com Arduino - Tutorial](#). Acesso em: 07 abr. 2025.
- Trommer, Elias. *Ultrasonic distance sensor from scratch – Receiver*. [s.l.], 2020. Disponível em: <https://www.etrommer.de/blog/electronics-ultrasonic-sensor-1/>. Acesso em: 27 jul. 2025.
- Pilling, David. *HCSR04*. David Pilling Wiki, [s.l.], 2021. Disponível em: <https://www.davidpilling.com/wiki/index.php/HCSR04>. Acesso em: 27 jul. 2025.

Nussenzveig, H. Moyses. *Curso de Física Básica – Volume 2: Fluidos, Oscilações e Ondas de Calor*. 4. ed. São Paulo: Blucher, 2002.

Porto, C.M. *A física de Aristóteles: uma construção ingênua?*. Revista Brasileira de Ensino de Física, Rio de Janeiro, v.31, n.4, p.4601, 2010. Disponível em: [SciELO Brasil - A física de Aristóteles: uma construção ingênua? A física de Aristóteles: uma construção ingênua?](#). Acesso em: 09 abr. 2025.

Souza, Cícero et al. *Demonstração e análise da interferência acústica utilizando um “tubo de Quincke” e a plataforma Arduino*. Revista Brasileira de Ensino de Física, Rio de Janeiro, v.43, e20210191, 2021. Disponível em: [SciELO Brasil - Demonstração e análise da interferência acústica utilizando um “tubo de Quincke” e a plataforma Arduino Demonstração e análise da interferência acústica utilizando um “tubo de Quincke” e a plataforma Arduino](#). Acesso em: 09 abr. 2025.

Souza jr., Itamar V. de et al. *Física Experimental com Arduino: ondas em uma corda tensionada*. Revista Brasileira de Ensino de Física, Rio de Janeiro, v.42, e20200177, 2020. Disponível em: [SciELO Brasil - Física experimental com Arduino: ondas em uma corda tensionada Física experimental com Arduino: ondas em uma corda tensionada](#). Acesso em: 09 abr. 2025.

Vuolo, José Henrique. *Fundamentos da Teoria de Erros*. 2. ed. rev. e ampl. São Paulo: Edgard Blücher, 1996.

Young, Hugh D.; Freedman, Roger A. *Sears e Zemansky: Física 2 – Termodinâmica e Ondas*. 14. ed. São Paulo: Pearson, 2016.

Casa da Robótica. *Módulo Leitor Temperatura MAX6675 + Termopar Tipo K*. Bahia, [s.d.]. Disponível em: <https://www.casadarobotica.com/sensores-e-modulos/modulos/outros/modulo-leitor-temperatura-max6675-termopar-tipo-k>. Acesso em: 1 ago. 2025.

Megasmart. *Sensor Ultrassônico de Distância HC-SR04 – Módulo Arduino*. [s.l.], [s.d.]. Disponível em: <https://www.megasmart.com.br/arduino/sensor-ultrassonico-de-distancia-hc-sr04-modulo-arduino>. Acesso em: 1 ago. 2025.

APÊNDICE A – LISTA DOS MATERIAIS UTILIZADOS PARA O DESENVOLVIMENTO DO ARRANJO EXPERIMENTAL

- Uma lâmpada tubular de led;
- Uma resistência de níquel-cromo;
- Duas cantoneiras L;
- Duas dobradiças simples;
- Duas abraçadeiras para lâmpada;
- Dois caps soldável tampão;
- Dois terminais anelar;
- 2,8 m de fios de cobre (0,20 mm²);
- 4,6 m de arame galvanizado;
- Tábuas de madeira pinus;
- Fios jumper (cabo wire);
- Arduino uno;
- Sensor HC–SR04;
- Sensor termopar tipo K;
- Módulo MAX6675;
- Fonte digital ajustável 24V e 3A;
- Parafusos;
- Ferro de solda;
- Cola quente;
- Furadeira;
- Micro Retifica;
- Fita adesiva isolante;
- Abraçadeiras com olhal de nylon;

APÊNDICE B – CÓDIGO EM C DESENVOLVIDO COM O AUXÍLIO DO CHATGPT PARA REALIZAR AS MEDIÇÕES DE VELOCIDADE E TEMPERATURA

None

```
#include <Wire.h>
#include <max6675.h>

/** Definição de pinos **/
const int trig_pin = 3;    // Pino Trigger do HC-SR04
const int echo_pin = 5;    // Pino Echo do HC-SR04
const int thermoD0 = 11;   // Pino D0 do MAX6675
const int thermoCS = 12;   // Pino CS do MAX6675
const int thermoCLK = 13;  // Pino CLK do MAX6675

/** Inicializa o sensor de temperatura **/
MAX6675 thermocouple(thermoCLK, thermoCS, thermoD0);

/** Controles para medição **/
bool medirTemperatura = false;
bool medirVelocidade = false;
unsigned long ultimoTempoTemperatura = 0;

/** Parâmetros de medição **/
const int numMedidas = 10000;
const int numLeiturasTemp = 100;
const int intervaloTemperatura = 30000;

/** Parâmetros de divisão em blocos **/
const int numBlocos = 10;
const int medidasPorBloco = numMedidas / numBlocos;

void setup() {
    Serial.begin(9600);
    pinMode(trig_pin, OUTPUT);
    pinMode(echo_pin, INPUT);
}
```

```

void loop() {
    if (Serial.available() > 0) {
        char comando = Serial.read();
        processarComando(comando);
    }

    if (medirVelocidade) {
        float velocidade = calcularVelocidadeSom();
        if (velocidade > 0) {
            Serial.print("Velocidade média das menores medidas: ");
            Serial.print(velocidade, 1);
            Serial.println(" m/s");
            medirVelocidade = false;
            Serial.println("Medição de velocidade parada.");
        }
    }

    if (medirTemperatura && (millis() - ultimoTempoTemperatura >=
intervaloTemperatura)) {
        ultimoTempoTemperatura = millis();
        float temperatura = calcularTemperaturaMedia();
        if (temperatura > -100) {
            Serial.print("Temperatura Média: ");
            Serial.print(temperatura, 1);
            Serial.println(" °C");
        }
    }

    delay(50);
}

void processarComando(char comando) {
    switch (comando) {
        case '0':

```

```

        medirTemperatura = true;
        Serial.println("Medição de temperatura iniciada.");
        break;
    case '1':
        medirVelocidade = true;
        Serial.println("Medição da velocidade iniciada.");
        break;
    case '2':
        medirTemperatura = false;
        Serial.println("Medição de temperatura parada.");
        break;
    case '3':
        medirVelocidade = false;
        Serial.println("Medição de velocidade parada.");
        break;
    }
}

float calcularTemperaturaMedia() {
    float somaTemperatura = 0;
    int leiturasValidas = 0;

    for (int i = 0; i < numLeiturasTemp; i++) {
        float temperatura = thermocouple.readCelsius();
        if (!isnan(temperatura) && temperatura > -100) {
            somaTemperatura += temperatura;
            leiturasValidas++;
        }
        delay(100);
    }

    if (leiturasValidas == 0) {
        Serial.println("Erro: Nenhuma leitura válida de
temperatura!");
        return -100;
    }
}

```

```

    }

    return somaTemperatura / leiturasValidas;
}

float calcularVelocidadeSom() {
    float menoresVelocidades[numBlocos];
    int blocosValidos = 0;
    int totalLeiturasValidas = 0;

    for (int b = 0; b < numBlocos; b++) {
        float menorVelocidadeBloco = 10000.0;
        int leiturasValidasBloco = 0;

        for (int i = 0; i < medidasPorBloco; i++) {
            unsigned long tempo = medirTempoPropagacaoSom();
            if (tempo >= 3100 && tempo <= 3400) {
                float velocidade = 1145000.0 / tempo;
                if (velocidade < menorVelocidadeBloco) {
                    menorVelocidadeBloco = velocidade;
                }
                leiturasValidasBloco++;
            }
            delay(20);
        }

        Serial.print("Bloco ");
        Serial.print(b + 1);
        Serial.print(": menor velocidade = ");
        Serial.print(menorVelocidadeBloco, 1);
        Serial.print(" m/s, leituras válidas = ");
        Serial.println(leiturasValidasBloco);

        if (leiturasValidasBloco > 0) {
            menoresVelocidades[blocosValidos] = menorVelocidadeBloco;

```

```
        blocosValidos++;
    }

    totalLeiturasValidas += leiturasValidasBloco;
}

if (blocosValidos == 0) {
    Serial.println("Erro: Nenhuma medida válida em nenhum
bloco!");
    return 0;
}

float soma = 0;
for (int i = 0; i < blocosValidos; i++) {
    soma += menoresVelocidades[i];
}
float media = soma / blocosValidos;

return media;
}

unsigned long medirTempoPropagacaoSom() {
    digitalWrite(trig_pin, LOW);
    delayMicroseconds(2);
    digitalWrite(trig_pin, HIGH);
    delayMicroseconds(10);
    digitalWrite(trig_pin, LOW);
    return pulseIn(echo_pin, HIGH);
}
```