



Universidade de Brasília

FACULDADE UnB PLANALTINA

CIÊNCIAS NATURAIS

**TECNOLOGIA DE ARDUINO APLICADA AO ESTUDO DA PROPAGAÇÃO DE
ONDAS MECÂNICAS EM SÓLIDOS**

Autor: LUCAS CAMPOS RIBEIRO

Orientador: Prof. ARMANDO DE MENDONÇA MAROJA



Universidade de Brasília

FACULDADE UnB PLANALTINA

CIÊNCIAS NATURAIS

TECNOLOGIA DE ARDUINO APLICADA AO ESTUDO DA PROPAGAÇÃO DE ONDAS MECÂNICAS EM SÓLIDOS

Autor: LUCAS CAMPOS RIBEIRO

Orientador: Prof. ARMANDO DE MENDONÇA MAROJA

*Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Banca Examinadora, como exigência parcial,
para a obtenção de título de Licenciado do
Curso de Ciências Naturais, da Faculdade
UnB Planaltina, sob a orientação do Prof. Dr.
Armando de Mendonça Maroja.*

Sumário

I.	INTRODUÇÃO.....	1
II.	REFERENCIAL TEÓRICO	3
	1. Movimento Ondulatório	3
	2. Arduino	7
	3. Audacity	13
	4. Osciloscópio.....	15
III.	Método.....	16
	1) O Arduino como instrumento de medida de tempo: medida de velocidades de milhares de metros por segundo.....	18
	a. Precisão do Arduino na medida de tempo com sensores Digitais e Analógicos....	18
	b. Tempo de resposta dos sensores Digitais: sensor Piezo Buzzer, sensor Piezoelétrico, sensor KY-038, sensor SW-18010P e sensor 801S.....	20
	c. Medindo a velocidade de som em sólidos com o Arduino	21
	2) Validação das medidas realizadas pelo Arduino	24
	a. Osciloscópio.....	24
	b. Ressonância	24
	RESULTADOS	25
	1) O Arduino como instrumento de medida de tempo: medida de velocidades de milhares de metros por segundo.....	25
	a. Precisão do Arduino na medida de tempo com sensores Digitais e Analógicos....	25

b. Tempo de resposta dos sensores Digitais: Sensor Piezo Buzzer, sensor Piezoelétrico e sensor KY-038, sensor SW-18010P e sensor 801S.....	28
c. Medindo a velocidade do som em sólidos com o Arduino	30
d. Ressonância	33
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	35
8. ANEXOS	36
9. REFERÊNCIAS.....	39

RESUMO

O estudo das ondas, no ensino de Ciências, é fundamental para compreensão dos fenômenos relativos à vibração dos materiais, à acústica, à ótica, à propagação de ondas sísmicas na Terra, dentre outros. A placa Arduino, que foi criada no ano de 2005 por um grupo de pesquisadores da Itália, tem sido uma tecnologia muito utilizada no estudo de temas na área de ciências devido a sua facilidade, acessibilidade, flexibilidade e baixo custo na produção de kit de experimentos. O objetivo deste trabalho é de pesquisar e de compreender a propagação de ondas em sólidos e de produzir um protótipo experimental, com a utilização do Arduino para medida da velocidade do som em sólidos, cuja magnitude é da ordem de milhares de metros por segundo. Dessa forma, iniciamos com a avaliação prévia na precisão da medida de tempo pelo Arduino e do tempo de resposta de sensores digitais e analógicos disponíveis no mercado. Na pesquisa foi desenvolvido um método para medida da velocidade do som em sólidos com o sensor digital Piezo Buzzer conectado a placa Arduino. No experimento, o valor determinado para velocidade do som em uma barra de aço 304, com o comprimento de 1,8m, foi de $(49 \pm 3) \times 10^2 m/s$ e para a barra de alumínio, com o comprimento de 0,69m, a velocidade de $(51 \pm 3) \times 10^2 m/s$. Os valores da velocidade determinados são compatíveis com os encontrados na literatura. Os resultados foram validados com um osciloscópio, no modo Pulso, conectado em paralelo com o Arduino e por meio do *software* Audacity mediante o uso do fenômeno da ressonância. Por fim, verificamos o potencial da pesquisa no estudo das ondas estacionárias em uma barra no ensino de Ciências com o *software* Audacity.

Palavras-chave: Arduino. Audacity. Velocidade do Som. Ondas Mecânicas. Sólidos.

I. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, diversas pesquisas apresentam o Arduino como uma alternativa para melhora nos processos de ensino e de aprendizagem de física, auxiliando o docente em aulas experimentais e facilitando a compreensão dos conceitos de física pelos estudantes (FRANÇA; ANDRADE; SILVA; FILHO, 2020).

Além de tudo, a falta de recursos materiais e de equipamentos para realização de experimentos simples e complexos, nos laboratórios destinados ao ensino de Física e de Ciências, é um problema recorrente nos laboratórios, tanto da rede de ensino pública quanto na privada. Sousa *et al* (2020) destacam que diversas abordagens didáticas surgem como alternativas na tentativa de desenvolver experimentos de baixo custo em locais onde não é possível a aquisição de laboratórios didáticos comerciais com esta finalidade. De mais a mais, Silveira e Girandi (2017) afirmam que os materiais nos laboratórios de ciências em escolas públicas têm sido um fator limitante nas práticas experimentais no ensino de física, dado a falta de recursos no ambiente escolar.

Ainda, a tecnologia de Arduino possibilita a realização de experimentos avançados com custo muito inferior aos praticados por empresas, que tradicionalmente vendem conjuntos experimentais para laboratórios, visto que os requisitos de hardware para o uso de computadores a fim de guiar experimentos com a plataforma Arduino são basicamente os mesmos para acesso à Internet. Assim é “aberta uma janela de oportunidades” para criar experimentos referentes ao ensino de Ciências e de Física, dado a elevada quantidade de sensores disponíveis: movimento, temperatura, corrente, vibração, luz e etc. Todavia, cabe ao docente saber como usar tal aparato em sala de aula. Destaca-se, ainda, a excessiva quantidade de informações disponíveis sobre Arduino na Internet que simplifica o uso dele e permite o rápido desenvolvimento de protótipos (SOUZA *et al*, 2020). Há também disponibilidade de propostas didáticas testadas em sala de aula e prontas para aplicação dentro dela (MOREIRA *et al*, 2018).

Além disto, Souza *et al* (2011, com adaptação) destacam: “A placa Arduino é baseada em um microcontrolador muito versátil que potencializa suas funções para além de uma simples interface passiva de aquisição de dados”. No caso deste projeto, medidas de tempo, de som e de vibrações (xyz) permitem determinar a frequência, o comprimento de onda, a intensidade do sinal e até mesmo avaliar se a onda é longitudinal ou se é transversal, por exemplo.

No ensino de Física e de Ciências, este tipo de medida com a Placa Arduino pode ser utilizado pelo professor para mostrar as propriedades das ondas sonoras e os efeitos das vibrações mecânicas de uma maneira mais aplicável e mais interativa, o que favorece a compreensão do movimento ondulatório por parte dos estudantes. São exemplos, o estudo de ondas em uma corda tensionada realizado por Sousa *et al*. (2020), a produção de instrumentação para análise de vibrações mecânicas nos domínios do tempo e da frequência utilizando a

plataforma Arduino por Varanis *et al.* (2016) e o estudo de vibrações mecânicas e ondas sonoras de um violão com a utilização de Arduino por Moreira (2019).

De forma geral, a determinação da velocidade das ondas em líquidos e em sólidos tem o dificultador de estarem em patamares de alguns milhares de metros por segundo, o que requer a medida precisa do tempo, isto é, com precisão de microssegundos. Além de tudo, a tecnologia de Arduino permite a determinação do tempo com esta precisão (MOREIRA, 2019) e mesmo a determinação da velocidade do som em barras metálicas por intermédio do tempo de voo (SOUZA; ARAÚJO; KAKUNO, 2020).

Dessa maneira, os objetivos deste trabalho têm como destaque realizar um estudo teórico da propagação das ondas em sólidos, desenvolver a análise de sinais e criar um aparato experimental para medida da velocidade do som em sólidos por intermédio do uso da plataforma Arduino.

II. REFERENCIAL TEÓRICO

1. Movimento Ondulatório

Rodrigues (2020, p. 31) caracteriza “o movimento ondulatório como vibrações em uma localidade no espaço que transportam momento, energia e informação”. Um exemplo bem simples consiste na propagação de ondas em corda no qual uma das extremidades é mantida fixa na direção horizontal em uma parede ao mesmo passo que na outra extremidade é exercida uma força (tensão) pela mão de um indivíduo, por meio de movimentos sucessivos nos sentidos cima e baixo. Dessa forma, “a oscilação (o sobe e desce da corda) está sendo transmitida ao longo da corda, e a velocidade com que esta oscilação é transmitida ao longo da corda será a velocidade de propagação da onda” (RODRIGUES, 2020, p. 31).

Ao analisar o fenômeno ondulatório na corda, a perturbação em tal objeto irá propagar-se em cada parte dela e ocasionará a deformação desta, e, após isto esta retornará ao seu estado de equilíbrio, isto é, para a posição inicial. Logo:

Trata-se de uma deformação elástica que está associada a uma energia potencial elástica. A propagação do pulso equivale, logo, à propagação da energia potencial elástica fornecida à corda no pulso inicial. Pelo princípio da conservação da energia mecânica, essa energia potencial não pode desaparecer quando o pulso atinge a outra extremidade da corda; se não há mais corda para ser percorrida para frente, logo o pulso irá voltar, ou seja, o pulso é refletido; este fenômeno é característico de qualquer propagação ondulatória que por alguma razão encontra um obstáculo à sua propagação (RODRIGUES, 2020, p. 32).

Nesse sentido, Rodrigues (2020) explica que um conjunto de vibrações ou de pulsos descreve o comportamento de uma onda, que também é constituída pelo ponto mais alto chamado crista e pelo ponto mais baixo chamado vale.

Em análise ao fenômeno que ocorre na corda:

Um ponto qualquer do meio material (no caso a corda), ao ser atingido pela onda, inicia um movimento vibratório, oscilando enquanto a onda passa por ele. A amplitude e a frequência de vibração deste ponto definem a amplitude e a frequência da onda, isto é, a amplitude e a frequência de uma onda são a amplitude (altura) e a frequência (número de oscilações de onda por determinado período de tempo) das vibrações de um ponto do meio no qual a onda se propaga. (RODRIGUES, 2020, p. 32-33).

Conforme Rodrigues (2020), não há influência de outro objeto material em uma onda no momento que essa informação e essa energia partem de uma posição para outra. Como no exemplo citado, “o ponto da corda é um elemento de massa da mesma, pois não se desloca no sentido horizontal para a esquerda e está indo de encontro à parede. Ele apenas sobe e desce no sentido vertical. O que se propaga é apenas a perturbação” (RODRIGUES, 2020, p. 33). As propriedades de uma onda são definidas:

I. No que diz respeito à natureza de uma onda:

As ondas mecânicas “são aquelas regidas pelas Teorias de Newton e primordialmente necessitam de um meio material (ar, água, corda, barra de cobre, etc.) para existirem, quer seja elástico ou seja por deformações. Exemplificações de ondas mecânicas são: sonoras, numa mola (elásticas) ou corda, ondas na água, dentre outros” (RODRIGUES, 2020, p. 33, com adaptação).

De acordo com Rodrigues (2020), as ondas eletromagnéticas não precisam obrigatoriamente de um meio para se materializar, porque possuem a capacidade de se propagarem no vazio. Dessa forma, o comportamento das ondas eletromagnéticas envolve

variáveis físicas oscilantes compostas de campos elétricos e campos magnéticos. Ademais, a rapidez no qual uma onda eletromagnética percorre é igual para todas elas, cujo valor é $c \cong 3 \times 10^8 m/s$. Exemplos dessas ondas são: de raios x, de rádio, de luz visível etc.

Dentre os fatores que podem afetar a velocidade de uma onda são: a frequência desta e o comprimento de onda dela. A exemplo disto, tem-se: as ondas em uma água, que ao observar determinado ponto fixo da superfície da água, nota-se que as ondas passam por tal ponto. Dessa forma, saber o tempo que leva entre o início de uma crista até a próxima crista de uma onda e a diferença da distância entre elas, torna possível encontrar a velocidade de uma onda. Igualmente, pode ser equacionada da seguinte maneira:

Velocidade da onda = comprimento de onda $\times$ frequência Eq.(1). (Hewitt, p. 362, 2015).

II. No que diz respeito à dimensão, Rodrigues (2020) aborda:

- As ondas unidimensionais se movimentam em uma única direção ou eixo (x) em um meio. Por exemplo: ondas em uma corda ou em uma mola.
- As ondas bidimensionais se movimentam em duas direções ou em dois eixos (x, y) em um meio. Por exemplo: propagação de uma onda na superfície da água.
- As ondas tridimensionais se movimentam em três direções ou em três eixos (x, y, z) em um meio. Por exemplo: onda sonora.

III. No que diz respeito à direção de Propagação e de Vibração, Rodrigues (2020) menciona:

- Em uma onda transversal, observa-se que a vibração dos pontos de um meio material é ortogonal à direção de propagação da onda. Exemplo: as vibrações em uma corda.
- Em uma onda longitudinal, verifica-se que a vibração dos pontos de um meio material é paralela à direção da propagação da onda.
- Em uma onda mista, nota-se que esta onda ocorre em trajetos de forma elíptica ao mesmo passo que ela está se propagando.

Outra característica interessante das ondas é a capacidade de coexistirem ao mesmo tempo em um mesmo espaço, por exemplo, quando uma pessoa joga duas pedras na água são geradas perturbações por ambas as pedras, de modo que, em algum momento, o encontro entre essas ondas resulte no aparecimento da interferência ondulatória. Neste fenômeno, pode ocorrer o reforço, o enfraquecimento e até mesmo a neutralização das ondas (HEWITT, 2015).

Será abordado a seguir um tópico acerca das vibrações forçadas:

Quando um diapasão de forquilha é colocado a vibrar, o som emitido será muito fraco. Mas se o apoiarmos no tampo de uma mesa após o percutirmos, o som produzido terá um volume maior. A razão é que o tampo da mesa é forçado a vibrar e, com sua superfície mais extensa, colocará em movimento uma maior quantidade de ar próximo a si. O tampo da mesa pode ser posto a vibrar por um diapasão de qualquer frequência. Este é um caso de vibração forçada. O mecanismo de uma caixa de música é montado sobre uma tampa de ressonância. Sem ela, o som produzido pelo mecanismo da caixa de música é difícil de escutar. Os tampos de ressonância são importantes em todos os instrumentos musicais de cordas (HEWITT, 2015, p. 382).

Conforme Hewitt (2015), todo objeto possui sua própria frequência natural. Quando uma vibração forçada ressoa com essa frequência, ocorre um grande aumento na amplitude, caracterizando o fenômeno da ressonância.

De acordo com Pizzeta *et. al* (2017, p. 2), “uma onda estacionária é formada quando dois tipos de ondas que possuem uma mesma amplitude e velocidade, contudo, em fases opostas”.

Uma maneira de compreender melhor as ondas estacionárias está no estudo de pulsos nos tubos, do qual pode ser observado que a amplitude de uma onda é perpendicular a direção de propagação deste pulso. Assim, ao acrescentar a amplitude de pressão e as moléculas de gás dentro do interior de um tubo, pode-se destacar que nos lugares onde há uma maior amplitude (denominado ventre de uma onda), o gás é escasso devido a sua expansão. De outro ponto de vista, os locais de menor amplitude (chamados nós de uma onda) no tubo, há uma maior presença do gás, que corresponde a sua compressão no meio. Portanto, pode-se interpretar o mínimo de deslocamento das partículas no tubo e o máximo de pressão coincidem, isto também é válido para o caso inverso. (PIZZETA *et. al*, 2017, p. 2, com adaptação)

Conforme Pizzeta *et. al* (2017, p. 2), para um tubo fechado em uma das extremidades e aberto na outra, para o primeiro modo de vibração, o comprimento do tubo equivale a um quarto do comprimento de onda e, portanto, a frequência de ressonância será $f_1 = \frac{v}{4L}$.

Analisando os demais modos de vibração pode-se mostrar que as frequências de ressonância são dadas pela equação:

$$f_f = n_f \frac{v}{4L} \quad \text{onde} \quad n_f = 1,3,5,7 \dots \quad \text{Eq. (3)}$$

Onde v é a velocidade de propagação da onda.

Similarmente, em um tubo aberto em ambas as extremidades, para o primeiro modo de vibração, o comprimento do tubo equivale à metade do comprimento de onda e, portanto, $f_1 = \frac{v}{2L}$. Observando os demais modos de vibração pode-se verificar que as frequências de ressonância para o tubo aberto em ambas as extremidades são dadas pela equação:

$$f_f = n_f \frac{v}{2L} \quad \text{onde} \quad n_f = 1,2,3,4 \dots \quad \text{Eq. (4)}$$

2. Arduino

As inovações tecnológicas permitiram a aceleração de processos, tais como a rapidez da comunicação e encurtamento de distâncias. Como é observado no ensino de Ciências, com a utilização de recursos didáticos como simulações que facilitam o entendimento do conhecimento científico na Medicina, com a maior precisão nos diagnósticos e na eficácia de tratamentos variados, na Engenharia, com o desenvolvimento e implementação por simulações computacionais e em várias outras áreas.

Diante da importância da tecnologia, pode-se citar o Arduino, que é uma placa que auxilia o indivíduo na realização de projetos eletrônicos de uma forma mais simplificada, econômica, dentre outros.

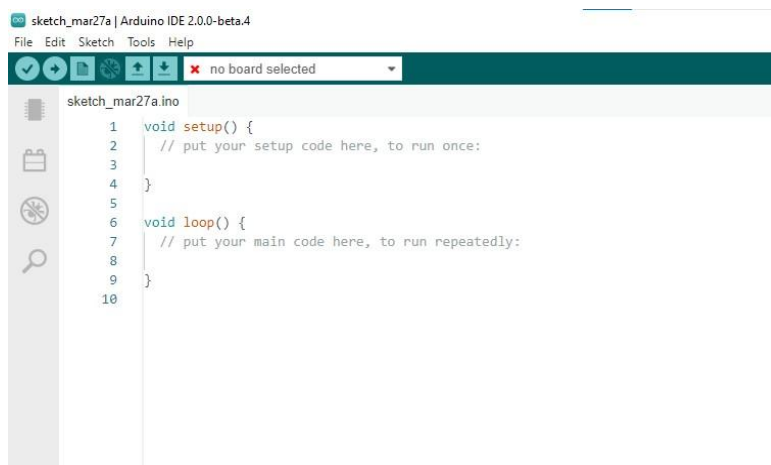
A placa Arduino como uma plataforma virtual constituída por um microcontrolador AVR da Atmel de código aberto e linguagem padrão baseada em C/C++ e em *softwares* e *hardwares* livres, possibilitando seu uso como gerenciador automatizado de dispositivos de aquisição de dados de sensores de entrada e de saída” (MARTINAZZO et. al, 2014, p. 24).

O Arduino possui um Ambiente Integrado de Desenvolvimento Arduino (IDE) com um editor de texto para a escrita do código, bem como uma área de mensagem, barras de ferramentas com botões de diferentes funções e um menu diversificado. Normalmente, é

conectado ao *hardware* Arduino/Genuíno para realizar o envio de programas desenvolvidos, além de servir como comunicação com esses programas (ARDUINO.CC, 2023).

A figura mostra o Ambiente Integrado de Desenvolvimento Arduino, *software* de controle da placa Arduino, que pode ser chamado de IDE.

Figura 1: O Ambiente Integrado de Desenvolvimento Arduino (IDE)



Fonte: Produzida pelo autor (2023)

O microcontrolador é composto a partir de um microprocessador, memórias, periféricos de entrada e saída e apresenta a possibilidade para programação de funções específicas, no caso de automações e controle de maquinarias. (CAVALCANTE; TALVOLARO; MOLISANI, 2011, p. 2).

“O Ambiente Integrado de desenvolvimento (IDE) consiste em uma aplicação *crossplatform* na linguagem de programação Java, que possibilita na escolha de sistemas operacionais (*Windows, Linux, Mac*), bem como esta linguagem é originada da IDE para depois a linguagem de programação *Processing*, concedendo oportunidade para visualização de gráfica em tempo real e do projeto *Writing*. Além de ter incluso um editor de código de fonte livre de identificação automática que compila e realiza o *upload* para placa com facilidade em um clique” (MARTINAZZO et. at, 2014, p. 24).

Cavalcante, Talvolaro e Molisani (2011) afirmam que o Arduino UNO R3 possui 6 portas analógicas e traz consigo a possibilidade de realizar medidas de tensões externas e de adquirir informações por um conjunto de sensores (temperatura, vibração, som, pressão

umidade, distância, de gases, fototransistores, etc.) Além disto, é composto por 14 portas digitais, dos quais são lidos e escritos na forma de sistema de numeração binário (0/1 ou HIGH/LOW). Este sistema está presente nos computadores e permite por exemplo, ligar ou desligar o LED no circuito e também as portas digitais podem ser configuradas para funcionar como modulações por largura de pulso ou *pulse-width modulation* (PWM).

Figura 2: Arduino Uno R3



Fonte: Arduino.cc

Conforme Patsko (2006), podemos definir a palavra sensor como “aquilo que sente”. Na eletrônica, um sensor é conhecido como qualquer componente ou circuito eletrônico que permita a análise de uma determinada condição do ambiente, desde a fazer algo simples como regular a temperatura ou a luminosidade, bem como realizar uma medida um pouco mais complexa, como a rotação de um motor, da distância de um carro até algum obstáculo próximo ou até mesmo eventos distantes do nosso cotidiano, como a detecção de partículas subatômicas e radiações cósmicas.

Os sensores podem ser classificados como um tipo de transdutor. Um transdutor é um componente que transforma um tipo de energia em outro. Um motor, por exemplo, é um tipo de transdutor, pois converte energia química ou elétrica em energia mecânica. Um alto-falante também é um transdutor, já que ele transforma energia elétrica em som. Porém, um sensor pode ser definido como um transdutor específico que transforma algum tipo de energia (luz, calor, movimento) em energia elétrica, utilizada para a leitura de alguma condição ou característica do ambiente. (PATSKO, 2006, p. 2).

O desenvolvimento de sensores e a sua aplicação trouxeram como consequência inúmeras vantagens ou comodidades para a vida moderna. Desde a possibilidade de aumentar a eficiência no funcionamento de um motor ou de uma linha de produção, realizar uma pesquisa científica com maior precisão e em menor tempo, até o fato de poder estacionar o carro sem o perigo de batê-lo ou de ter a segurança de que qualquer tentativa de furto de sua casa poderá ser frustrada, tais são as vantagens oferecidas pelo uso de sensores. (PATSKO, 2006, p. 2)

Dentre os inúmeros sensores que o Arduino possui, neste trabalho, serão utilizados os sensores do tipo que medem a vibração e o som conforme Arduino.cc (2005), a figura 3 ilustra os sensores avaliados no trabalho.

Figura 3: Sensores Avaliados no trabalho



Figura 3.a: SW-18010P
Fonte: Autor (2023)

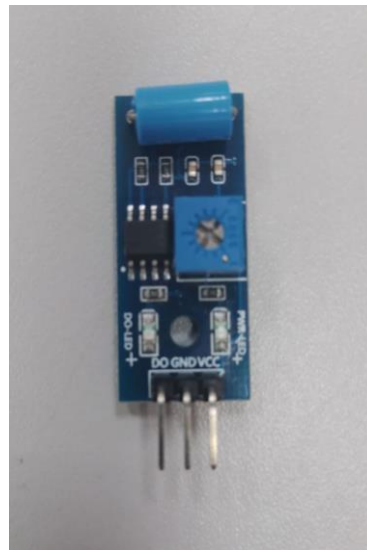


Figura 3.b: SW-420
Fonte: Autor (2023)

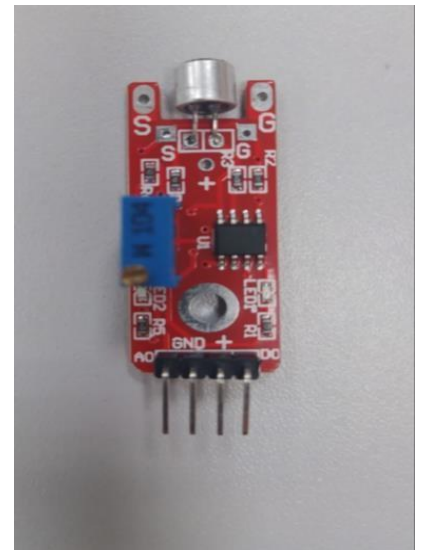


Figura 3.c: KY-038
Fonte: Autor (2023)

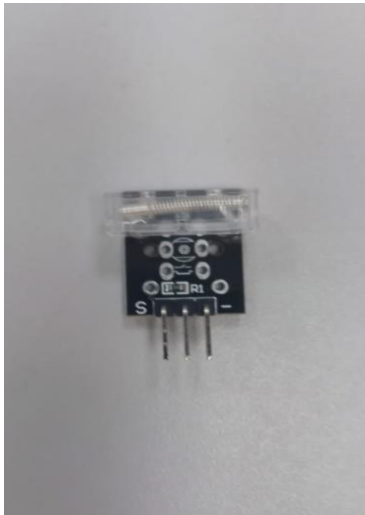


Figura 3.d: SW-031
Fonte: Autor (2023)



Figura 3.e: Piezoelétrico
Fonte: Autor (2023)

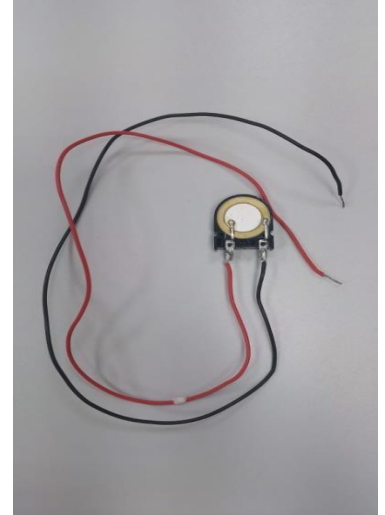


Figura 3.f:PeizoBuzzer
Fonte: Autor (2023)



Figura 3.g: Sensor 801S
Fonte: Arduino.cc (2023)

No ano de 2020, Souza *et al.* (2020) realizaram o seguinte estudo da velocidade do som em metais pelo método do tempo de voo. No procedimento experimental, foi gerado um pulso em determinado ponto de uma barra e então, aferido o tempo que levou para que este pulso atravessasse a barra até a outra extremidade da barra. Por intermédio de artifícios matemáticos, foi encontrada a velocidade do som na barra metálica em relação da distância entre as extremidades da barra e do tempo.

Um pulso longitudinal, doravante pulso, é produzido em uma das extremidades de uma barra metálica, por exemplo, permitindo que esta sofra uma queda livre sobre uma superfície metálica rígida (denominada de base) e de massa muito maior do que a massa da barra. Quando a barra colide com a base, é produzido um pulso que se propaga na barra até a outra extremidade (livre) e como há uma mudança brusca de meio, extremidade livre da barra com o ar, uma parte significativa do pulso retorna pela barra, fazendo a mesma “pular” (ação e reação) (SOUZA *et al.*, 2020, p.1).

Souza *et al.* (2020) destacam que ao decorrer do tempo em que o pulso percorre a barra, está ainda mantendo contato com a base, assim o pulso é retornado à extremidade, do qual o choque foi gerado pelas forças de ação e reação e isto faz com que a barra se separe da base, dado que a base realiza o ato de “empurrar” a barra. Desse modo, ao medir o tempo de contato da barra com a sua base, é obtido o tempo para que o pulso possa percorrer o comprimento da barra duas vezes e assim calcular a velocidade pela divisão do dobro do comprimento pelo tempo, o que corresponde a velocidade de propagação de onda sonora na barra.

O tempo de propagação deste pulso que ocorre na barra é pequeno, bem como o tempo de contato da barra com a base, o que impossibilita sua medição manualmente, como no caso do cronômetro. Uma solução é a medida que envolve alguma grandeza elétrica, porque o intervalo desejado para a medição está por volta de dezenas ou até centenas de microssegundos que dependem do comprimento da barra (SOUZA *et al.*, 2020).

No que tange o funcionamento do contato que ocorre entre a barra metálica e uma base, Souza *et al.* (2020) afirmam:

O contato entre a barra metálica e uma base, também metálica, funciona de forma análoga a uma chave do tipo liga-desliga. No trabalho de Speziali, essa “chave” é utilizada para descarregar um capacitor em um circuito série formado por um capacitor (C), um resistor (R) e a “chave”, enquanto a “chave” estiver fechada o capacitor irá descarregar e o valor da carga resultante corresponde ao tempo do pulso se propagar por toda a barra e retornar (SOUZA *et al.*, 2020, p. 1-2).

Dessa forma, no tempo que a “chave” não está aberta, o microprocessador mede a contagem deste tempo em unidades muito precisas (microssegundos) por intermédio do comando `pulseIn()` que detecta e captura o intervalo de tempo de um pulso em um pino (ARDUINO, 2005). As velocidades do som determinada estão na faixa disponíveis na literatura. A tabela abaixo mostra os valores de referência da velocidade do som para o aço e o alumínio (*The EngineeringToolBox*, 2004):

Tabela 1: Velocidade de som nos Materiais

Sólido	Velocidade do Som (m/s)		
	Longitudinal	Cisalhamento	Extensional
Alumínio	6420	3040	5000
Aço	5790	3100	5000

Fonte: (*THE ENGINEERINGTOOLBOX*, 2004)

De acordo com a Tabela 1, a diferença nos valores indica que as ondas longitudinais são as mais rápidas, uma vez que estes materiais resistem bem a deformação (compressão e expansão). Ao contrário das ondas de cisalhamento que são mais lentas em decorrência da maioria dos materiais resistirem menos à torção (movimento de corte). É diferente nas ondas extensionais que ocorrem em barras e estruturas normalmente alongadas, nesse caso, a velocidade dependerá do formato da estrutura do material.

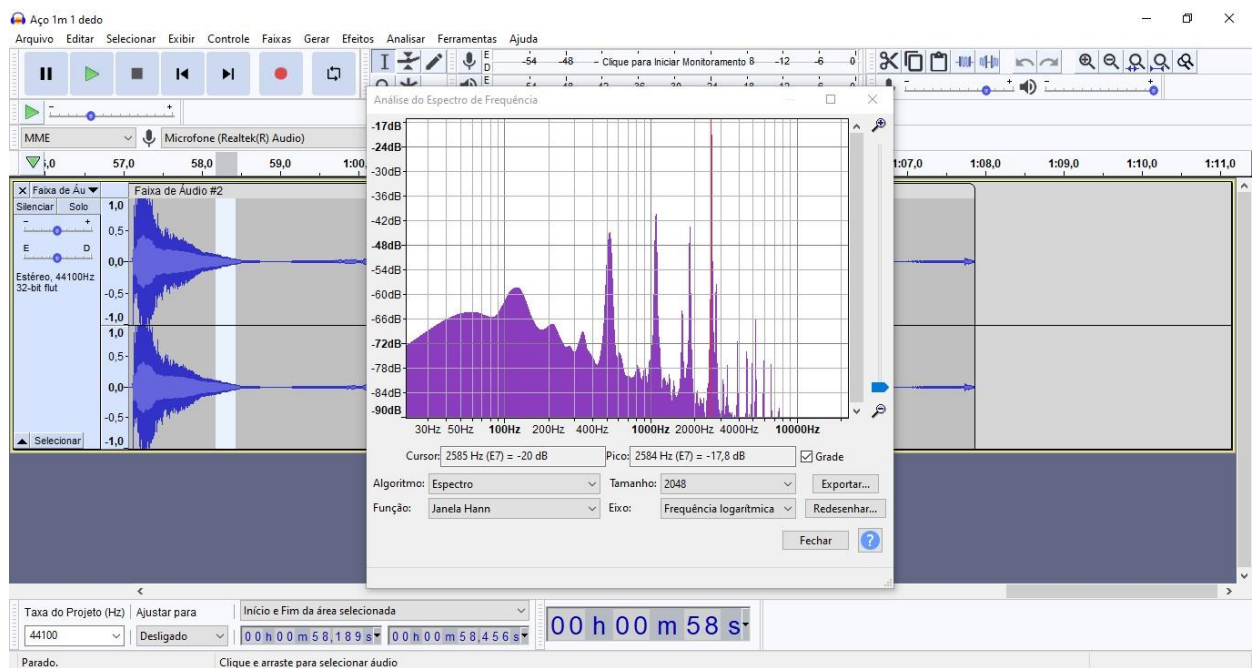
Na validação das medidas realizadas pelo Arduino utilizamos o *software* de edição e áudio Audacity e o osciloscópio digital, ajustado no modo pulse, uma configuração do dispositivo que permite observar detalhadamente a forma e as características das primeiras vibrações da barra com precisão de microssegundos e mesmo nanosegundos.

3. Audacity

“O *software* Audacity é um programa gratuito profissional de gravação e edição de áudio para Windows, Mac e Linux.” Ele possui ferramentas que possibilitam a reprodução de sinais sonoros, a gravação, a importação e exportação de arquivos de som em diferentes formatos, a análise de espectros de frequência, da forma que o sinal sonoro é captado, dentre outros. Possui

um design fácil de usar e possibilita a demonstração de fenômenos ondulatórios como a ressonância. (RIBEIRO et. al, 2018). A figura 4 ilustra a gravação e a análise, espectro de frequência de uma barra de aço de 1m segurada no meio com os dedos.

Figura 4: Espectro de frequência de uma barra de aço 301 de 1m



Fonte: Autor (2023)

O *Software Audacity* utiliza da ferramenta matemática Transformada Rápida de *Fourier* (FFT – *Fast Fourier Transform*) como um algoritmo para obter o espectro de frequência dos materiais da pesquisa, que permite a identificação das frequências presentes no sinal e processá-las, servindo para remoção de ruídos de áudios presentes no sinal. Conforme *Fechine* (2010), a série e a transformada de Fourier são operações matemáticas importantes para o estudo da análise de sinais, tendo em vista que simplificam cálculos complexos, se aplicada da forma correta. A autora também afirma que:

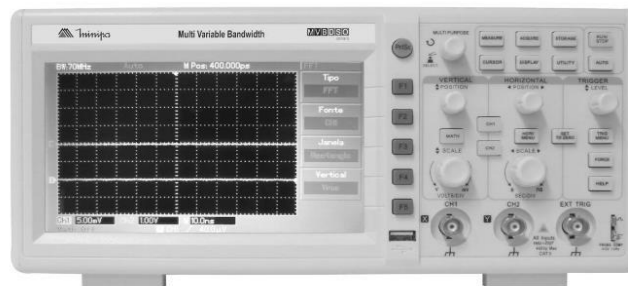
“Um sinal é resultado de funções com uma ou mais variáveis independentes que carregam alguma informação de um determinado fenômeno físico” (FECHINE, 2010, p. 7).

Dessa forma, ao analisar sinais, a série de Fourier possibilita decompor um sinal periódico complexo em senos e cossenos, em contrapartida, a transformada de Fourier descreve o espectro do sinal, isto é, todas aquelas frequências que o compõem. Com isto, este trabalho utiliza da transformada de Fourier para o estudo da avaliação de sinais.

4. Osciloscópio

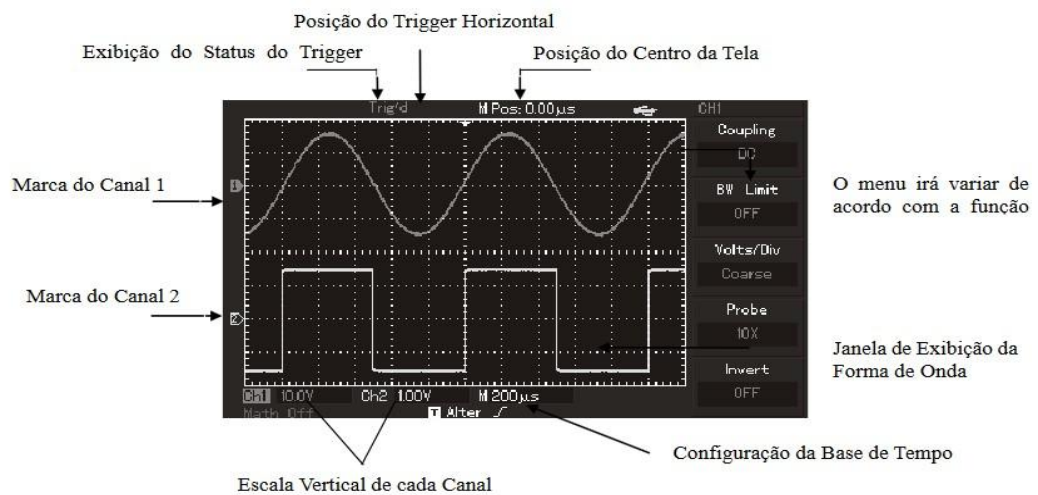
O osciloscópio é um dispositivo digital muito utilizado na física que permite realizar estudos da análise de sinais, pulsos, ondas. A sua funcionalidade está no fato de gerar gráficos (tensão *versus* tempo) desses sinais que medem grandezas como a frequência, amplitude de onda, período, tempo, dentre outros (SANTOS, 2020, p.14). As figuras 5 e 6 ilustram um osciloscópio e sua interface.

Figura 5: Osciloscópio



Fonte: Minipa (2013)

Figura 6: Interface do Osciloscópio



Fonte: Minipa (2013)

De acordo com o Minipa (2013), a análise de sinais no osciloscópio pode ser feita pelo modo pulso que possibilita a captura e a exibição das diferentes formas de onda de pulsos e de

sinais digitais. Nesta configuração, é possível definir parâmetros de disparo de um pulso, tal como, a frequência, período, largura mínima ou máxima, que podem auxiliar no aprofundamento de estudos de ondas no equipamento.

O desenvolvimento do trabalho iniciou com a avaliação da precisão na medida de tempo com o Arduino com sensores digitais e analógicos, em seguida foi avaliado o tempo resposta dos sensores de som e vibração disponíveis no mercado, apresentados na figura 3. Então, foi desenvolvido o método para a medida da velocidade do som em sólidos com o Arduino para em seguida validar as medidas obtidas pelo Arduino com o uso de dois recursos: o osciloscópio digital MVB-DSO 1100 e o *software* de edição de áudio Audacity.

III. Método

A medida de tempo padrão no Arduino é realizada pelo comando *millis()* (precisão de 10^{-3} s). Uma medida mais precisa pode ser realizada com o comando *micros()* [10^{-6} s]. Conforme Arduino.cc (2023), esses comandos retornam o tempo em milissegundos ou em microssegundos passados desde que a placa Arduino começou a executar o programa atual. O comando *micros()* foi o utilizado na medida da velocidade do som nos sólidos, dada sua magnitude na faixa de milhares de metros por segundo.

Em placas Arduino 16 MHz como o Nano e UNO, o comando *micros()* tem uma resolução de quatro microssegundos (ou seja, o número retornado será sempre múltiplo de quatro microssegundos).

O estudo iniciou com uma pesquisa focada em dois pontos, primeiro os comandos do Arduino com enfoque na medida do tempo e segundo na precisão dos sensores de som e de vibração disponíveis no mercado para tornar viável a medida da velocidade do som em sólidos.

O primeiro comando de interesse foi o PIND, que realiza a leitura e o armazenamento do estado de um conjunto de pinos digitais, possibilitando que os estados de vários sensores digitais sejam avaliados simultaneamente.

O comando *PulseIn()*, comentado previamente na seção II.2, não se mostrou ideal para este trabalho, dado que a pesquisa tem por objetivo a medida da velocidade do som em barras metálicas e outros sólidos como o granito, onde o procedimento utilizado por Souza et. al, 2020 não pode ser aplicado.

Durante as medidas experimentais, se verificou que o experimento não se resumiu em colocar os sensores nas extremidades do sólido, em encontrar a distância e o tempo do pulso percorrido na barra e, assim, encontrar a velocidade de som do material. Também foi importante para a análise: a precisão e o tempo de resposta dos sensores.

Na validação das medidas realizadas com o Arduino, utilizamos duas metodologias: medidas do “tipo pulso com o osciloscópio digital” (Souza et. al, 2020, medida pulso osciloscópio) e a ressonância das barras metálicas utilizando o *software* Audacity (Maloney, 2022, 7:15).

O método foi dividido em três partes:

- i. O estudo experimental acerca da precisão de sensores digitais e analógicos: um sensor analógico possui uma saída contínua que é diretamente proporcional à dimensão da medida e que gera um sinal analógico (os valores da tensão variam conforme a mudança constante do fenômeno estudado de 0 a 5V). Por outro lado, um sensor digital tem sua saída no modo de um sinal lógico binário (“0” ou “1”, “HIGH” ou “LOW”), que limita o seu uso, podendo apenas adquirir informações em um mesmo instante, como a presença, ausência, dentre outros. Assim, o estudo tem por objetivo definir qual dos sinais seria utilizado e quais sensores são mais precisos para a medida de tempo de um pulso.
- ii. O tempo de resposta dos sensores e a sensibilidade dos sensores: há inúmeros sensores de vibração e de som disponíveis para a venda, saber qual deles tinha o tempo de resposta da detecção do pulso foi um dos desafios neste método. Ademais, o modo com que se batia o martelo na barra metálica influenciava os resultados medidos no Arduino.
- iii. Validação das Medidas: a última etapa com a utilização dos recursos Osciloscópio e Audacity serviram como confirmação dos resultados que foram obtidos com a placa Arduino Uno no laboratório de Física da Universidade de Brasília-UnB, do campus de Planaltina (FUP).

1) O Arduino como instrumento de medida de tempo: medida de velocidades de milhares de metros por segundo

a. Precisão do Arduino na medida de tempo com sensores Digitais e Analógicos

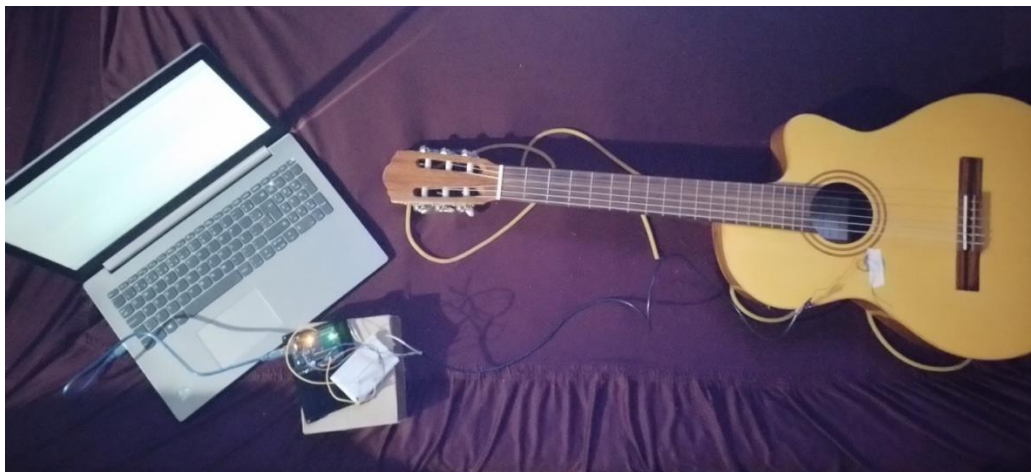
O Arduino possui uma ampla gama de sensores do tipo analógica e/ou digital. Deste modo, neste estudo experimental foram selecionados especificamente aqueles que apresentavam a capacidade de detectar o som e/ou as vibrações. Primeiro, foram produzidos programas no ambiente de programação do Arduino (IDL), de modo a avaliar o tempo entre duas medidas analógicas e ou digitais dos sensores de som ou vibração de diferentes formas:

1. **Programa I - Digital/AnalogRead:** o programa realiza a medida e depois, por meio do comando `Serial.print` e a comunicação do serial monitor pelo comando `Serial.begin`, é mostrado os resultados sem gravar em uma variável indexada.
2. **Programa II - Digital/AnalogRead (Gravada):** o programa realiza a medida, contudo as medidas são realizadas apenas no final. Assim, o programa primeiro grava as medidas em uma variável indexada e só imprime no “serial monitor” no fim.
3. **Programa III - PIND (variável Irpin):** o programa imprime os resultados também gravando em uma variável, entretanto, com o comando de leitura PIND no lugar do comando `digitalRead()`. O comando é limitado somente para a leitura digital.

Dada a limitação de memória do Arduino Uno, foram realizadas 200 medidas em cada experimento. Logo, os seguintes sensores foram avaliados: acelerômetro e giroscópio MPU-5060, detector de som/ruído KY-038 (Digital e analógico), piezoelétrico (Digital), Piezo Buzzer (Digital e analógico), toque e batida KY-031 (Digital), movimento vibração SW-420 (Digital), vibração SW-18010P (Digital e analógico). Na avaliação dos sensores, cada um destes foi colado com uma fita no tampo de um violão padrão e então foi dedilhada a corda mais grossa 6, que é a nota Mi (E – 82,41 Hz). No Arduino IDE, o conjunto de 200 medidas realizadas em cada experimento impressas no Serial Monitor foram copiadas e em seguidas coladas no Excel de modo a determinar o tempo médio entre medidas em cada caso.

A figura 7 apresenta a montagem para a realização da medida de precisão dos sensores de som e vibração com os sinais digitais e/ou analógicos. Na figura, foi colocado um garrote de soro da cor amarela (látex) abaixo do violão para evitar interferência externa sonora e interferisse nos resultados. Em seguida, uma fita foi fixada no sensor Piezoelétrico, próximo as cordas do violão, um fio chamado *Jumper*, que servirá para manter a conexão do circuito sensor, a placa Arduino e Protoboard, onde ocorre a montagem do circuito. Enquanto o cabo USB azul tem a função de alimentar o Arduino e de comunicação Arduino-Computador.

Figura 7: Montagem experimental da precisão dos sensores digitais e analógicos



Fonte: Autor (2023)

Em seguida, foram realizados outros testes no laboratório de Física para medida da velocidade do som em barras de metal, utilizando o intervalo de tempo medido por dois sensores digitais colocados nas extremidades da barra. No andamento do experimento, ficou evidente que as medidas de velocidade do som nas barras não correspondiam aos valores disponíveis na literatura para a velocidade do som em sólidos. Já os intervalos de tempo medidos entre os sensores posicionados no início e no final da barra variavam aleatoriamente entre algumas dezenas de microssegundos até milhares de microssegundos.

Para averiguar o que realmente estava ocorrendo, foi adicionado um osciloscópio digital em paralelo com o Arduino, no qual o canal 2 (traço azul na figura 10) foi conectado ao sensor no início da barra e o canal 1 (traço amarelo na figura 10) ao sensor no final da barra. Com isto, foram realizados ajustes no osciloscópio para dar início a aferição de pulsos, de acordo com os procedimentos mostrados no vídeo (Maloney, 2022, 7:15) e, ao mesmo tempo, das medidas via

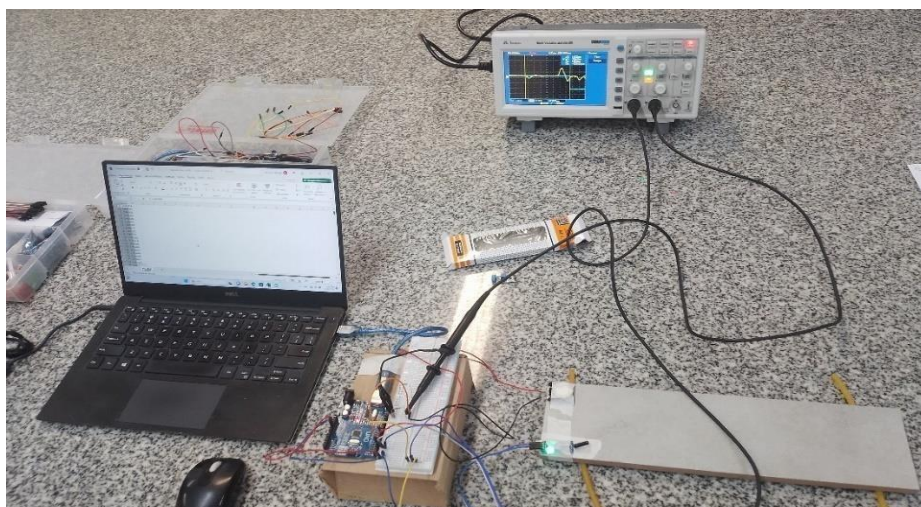
Arduino dos vários sensores de som e/ou vibração. Após a coleta dos dados, foi feita a avaliação do tempo de resposta dos sensores usados. Inicialmente, a expectativa era de que os sensores analógicos seriam o ideal para o desenvolvimento do projeto, entretanto, no final os sensores digitais se mostraram mais precisos.

b. Tempo de resposta dos sensores Digitais: sensor Piezo Buzzer, sensor Piezoelétrico, sensor KY-038, sensor SW-18010P e sensor 801S.

Na avaliação do tempo de resposta, conjuntos de dois sensores foram posicionados lado a lado em uma das duas extremidades de uma cerâmica retangular. Nesse caso, o procedimento apresentou semelhanças com o que foi utilizado anteriormente com o violão, contudo a diferença foi uma batida longitudinal com a parte do cabo de uma chave de fenda para que não quebrasse a cerâmica (frágil) que ocorreu no ponto médio entre os sensores em cada medida. Como o sensor Piezo Buzzer teve o melhor resultado no tempo de resposta, foi escolhido como referência na comparação com os demais.

A figura 8 apresenta a montagem do experimento com os sensores SW-420 e o Piezo Buzzer posicionados lado a lado fixados por uma fita em uma das extremidades da cerâmica colocada sobre garrote de soro. O conjunto sensores, Arduino, protoboard e jumpers representam o circuito do programa enquanto a placa Arduino era alimentada pelo computador via cabo USB. Os cabos dos canais 1 e 2 do osciloscópio foram conectados aos sensores nos respectivos resistores dentro do circuito. Foi mostrado na tela do osciloscópio o pulso gerado pela batida entre os dois sensores com uma chave de fenda, a curva amarela representa o Piezo Buzzer e a curva azul o SW-420.

Figura 8: Montagem experimental tempo de resposta. Sensor HW-420 e Piezo Buzzer



Fonte: Pelo autor (2023)

Destaca-se que na ligação do Piezo Buzzer no Arduino foi utilizada a estratégia de “chave de disparo” já citada na seção (II.b). Nesse caso, o sensor substituiu o contato barra/aterramento.

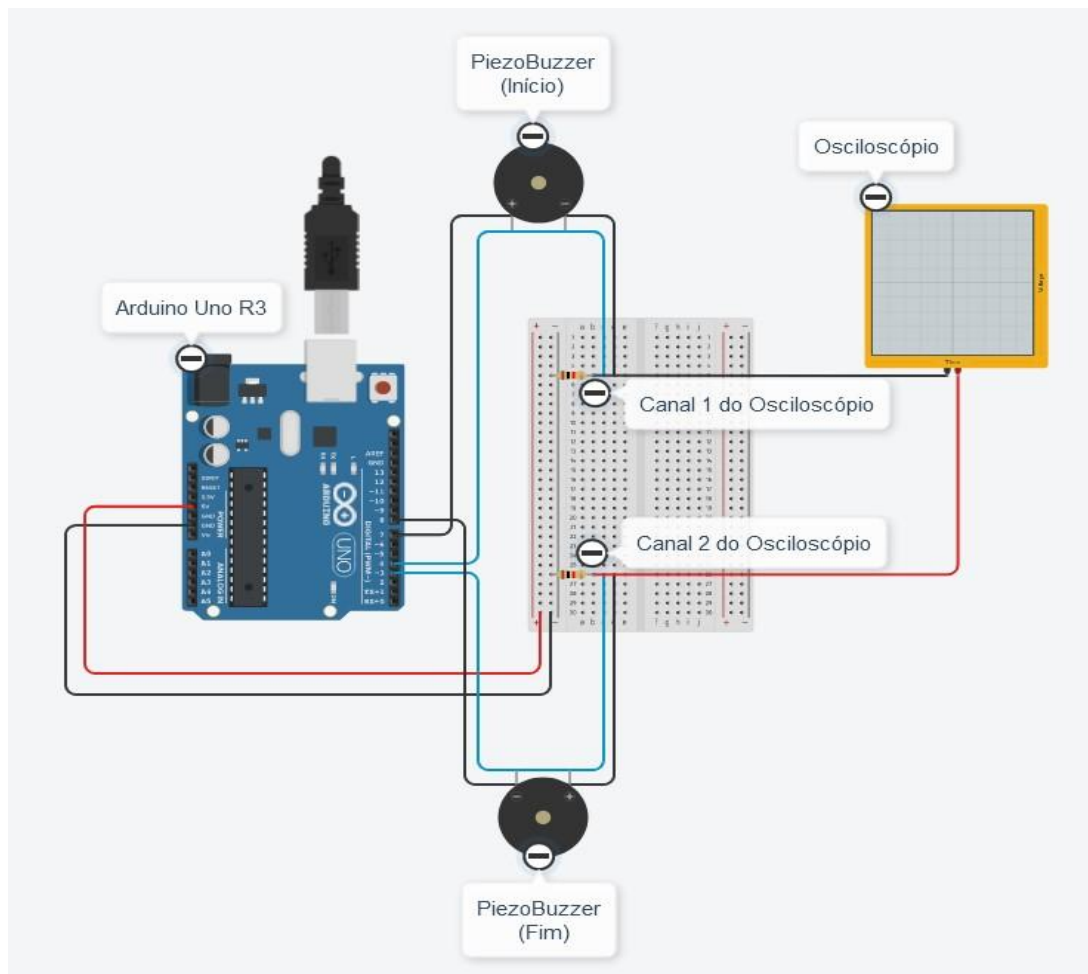
Diante disto, em cada medida foi computada a diferença de tempo entre as medidas que os sensores digitais detectaram, no qual a batida sinalizou o início da medida de tempo no sensor Piezo Buzzer. O programa padrão feito no Arduino IDE está no anexo 1. Os comentários informam o que o código realizou. No momento que o segundo sensor detectou a batida, foi medido o tempo que o pulso produzido pela batida da chave de fenda chegou na outra extremidade da barra. Na tela do osciloscópio apareceram os sinais dos sensores no equipamento, a janela de tempo pode ser ajustada, se necessário, cujo intervalo de tempo é equivalente a um intervalo de cerca de algumas centenas de microssegundos. O Osciloscópio foi conectado em paralelo com os sensores medindo simultaneamente o captado pelo Arduino.

c. Medindo a velocidade de som em sólidos com o Arduino

Dentre todos os sensores, o conjunto que apresentou o melhor tempo de resposta e, portanto, o mais adequado para realização das medidas foi o conjunto de dois sensores Piezo Buzzer. A montagem foi análoga a da seção anterior, agora os sensores foram posicionados nas extremidades da barra.

A figura 9 ilustra a montagem do circuito de medida do Arduino com os dois sensores Piezo Buzzer. O circuito foi desenhado no *tinkercard*, uma plataforma que permite a construção de protótipos sem precisar do Arduino físico.

Figura 9: Montagem do Circuito no Arduino com 2 Piezo Buzzer no tinkercad

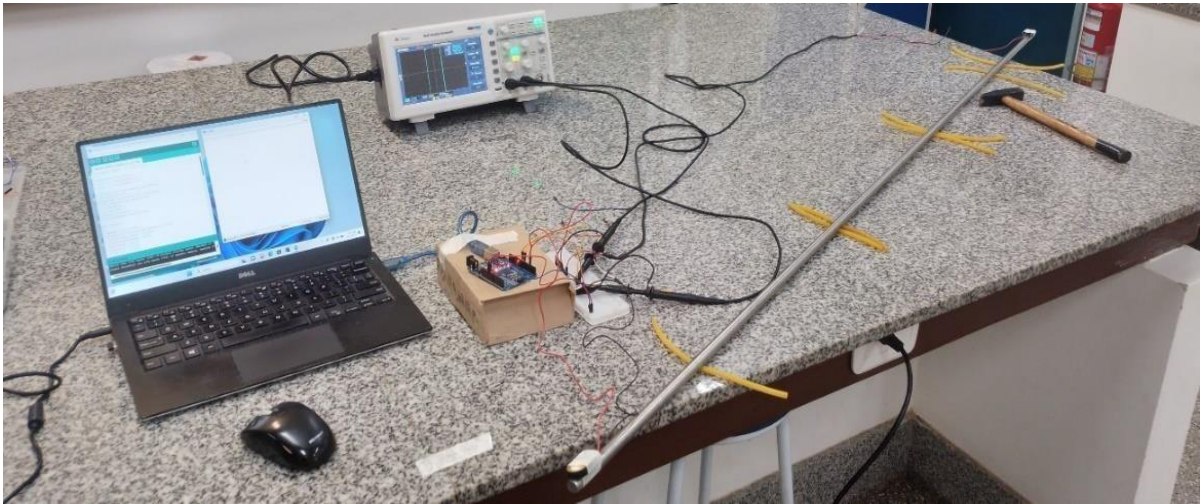


Fonte: Autor (2023)

A figura 10 ilustra a montagem com os dois sensores fixados nas diferentes extremidades de uma barra de aço 301, com 1m de comprimento, suspensa sobre garrotes de soro de látex que servem como “isolantes de vibrações”. Os sensores foram conectados com os fios pretos adaptados por jumpers nas entradas digitais 3, 4, 7 e 8, enquanto na protoboard foram feitas as conexões auxiliares necessárias. Os canais 1 e 2 do osciloscópio foram fixados nos resistores 1 (início da medida) e 2 (fim da medida). Então, o computador alimentou o Arduino via cabo USB azul enquanto foi executado o programa padrão, anexo 1, ao mesmo passo foi visualizado no monitor serial o intervalo de tempo que o pulso levou para percorrer a barra metálica. Ao mesmo tempo em que foi mostrado na tela do osciloscópio os sinais correspondentes à cada canal na escala de 200 microssegundos e 5 volts.

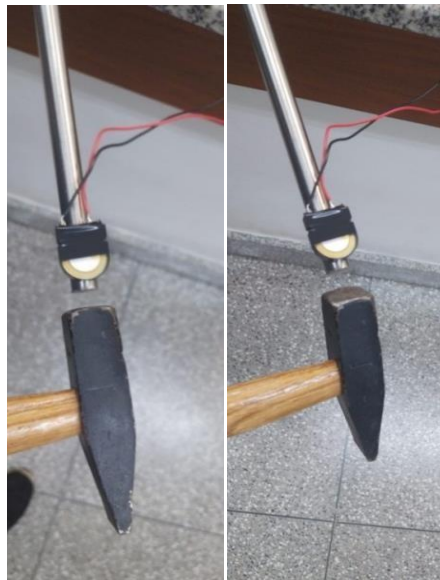
Um fato importante é mostrado na figura 11, no momento da batida, o martelo deve ser inclinado de modo a produzir vibrações tanto longitudinais quanto verticais, de modo a sensibilizar de imediato o sensor no início da barra.

Figura 10: Montagem experimental da velocidade do som em sólidos com 2 Piezo Buzzer



Fonte: Autor (2023)

Figura 11 – Método da batida inclinada



Fonte: Autor (2023)

2) Validação das medidas realizadas pelo Arduino

a. Osciloscópio

O osciloscópio foi empregado como primeira metodologia de validação dos experimentos. Assim, o osciloscópio digital MVB-DSO foi ajustado para medida do pulso (Maloney, 2V-200 μ s) que permite visualizar pulsos na escala de tempo de segundos até nanosegundos. (MINIPA, 2013). A montagem do osciloscópio junto com o Arduino é apresentada na seção III.1.c.

A segunda metodologia da comprovação das medidas do tipo “Ressonância com o *software* Audacity” iniciou-se com a gravação do som no aplicativo, com taxas superiores a 100kHz, que puderam avaliar com maior precisão e detalhamento das oscilações que ocorreram na barra. O aplicativo tem as opções que mostram o gráfico da onda e também do espectro de Frequência que servem de parâmetro para realizar a medida da velocidade do som pelo pico de maior intensidade mostrado no gráfico, como citado na seção II.3.

b. Ressonância

Duas montagens experimentais para a avaliação da ressonância dos materiais foram realizadas.

Na primeira montagem, uma fita marcou exatamente a metade do comprimento, da barra que é segurada apenas por esse ponto central. Então, uma das extremidades foi aproximada do microfone de um notebook com *Software* Audacity aberto e preparado para gravar o som. Na outra extremidade, uma batida na direção longitudinal do eixo da barra metálica foi aplicada, que excitou ondas estacionárias, modo fundamental (veja Equação 4) que foram captadas pelo microfone.

Na segunda montagem duas fitas foram coladas exatamente a um quarto do comprimento em relação as extremidades da barra metálica. A barra foi segurada nestes dois pontos firmemente por outra pessoa e então como no caso anterior, uma das extremidades foi aproximada do microfone do notebook com o *Software* Audacity aberto e gravado enquanto a outra extremidade foi atingida por uma batida longitudinal do martelo. Agora foi excitado o segundo modo de vibração.

A figura 4 ilustra uma medida típica de aço com 1m. É evidente que as oscilações se devem as pequenas alterações da amplitude, sobrepostas ao decaimento, da distância a extremidade da barra e do microfone.

É observado que a barra quando segurada no meio ou em dois pontos a $1/4L$ das extremidades são excitadas ondas estacionárias similares as produzidas no interior de um tubo com as extremidades abertas, Eq.4. No caso de ser segurada no centro, são excitados primeiro e o terceiro harmônicos enquanto quando seguradas a $1/4L$ das extremidades, o segundo harmônico é excitado.

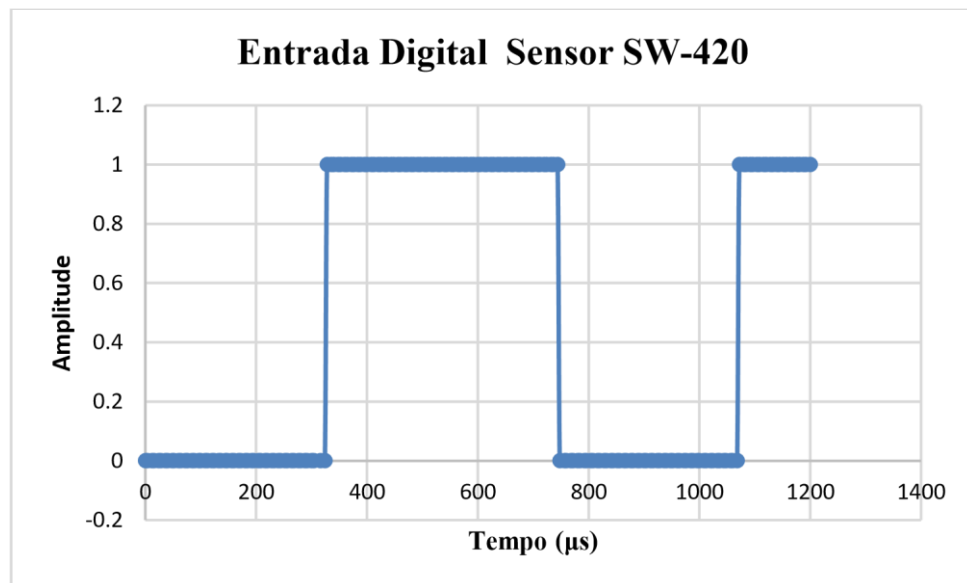
RESULTADOS

1) O Arduino como instrumento de medida de tempo: medida de velocidades de milhares de metros por segundo

a. Precisão do Arduino na medida de tempo com sensores Digitais e Analógicos

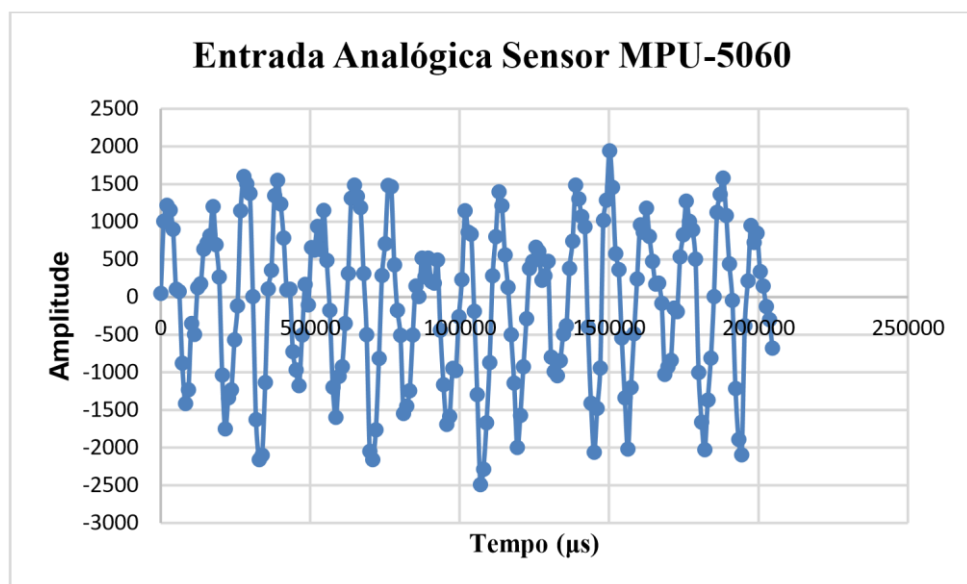
De forma geral, os sensores de som e vibração foram classificados quanto ao respectivo tipo de entrada (digital e/ou analógica) e o tempo médio que cada um deles levou para detectar uma perturbação no meio. Dessarte, os gráficos 1 e 2 ilustram medidas típicas da vibração da corda mi de um violão detectada com um sensor DIGITAL – SW-420 e com um sensor Analógico – Acelerômetro e Giroscópio MPU-5060. Ficou visível que o tempo entre as duas medidas apurado para o sensor digital SW-420 foi de $6\mu s$, enquanto para o sensor analógico foi de $1030\mu s$. Como observado no gráfico 2, é possível inferir que as oscilações que apresentam a amplitude irregular, compreendem um tempo de coleta de aproximadamente $1000\mu s = 1ms$, o que corresponde à $\frac{1}{12}$ do período da onda. Desse modo, ter 12 pontos por período no trabalho se mostrou insuficiente para a definição detalhada da oscilação de 82Hz. Portanto, o tempo total foi dado pelo produto do número de medidas e da medida do tempo do sensor analógico: $200 \times 1030\mu s = 206000\mu s = 1,2ms$, comparável ao tempo total apresentado no gráfico. O resultado obtido no gráfico 2 pelo sensor analógico MPU-5060 não apresentou uma melhor resolução de uma onda senoidal devido ao fato da taxa de coleta do sensor ser muito pequena, o que é observado na tabela 2 com o sensor MPU-5060 com a variação do tempo na faixa dos $1030\mu s$, que é aproximadamente 12 pontos por período da onda.

Gráfico 1: Entrada Digital (Arduino)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Gráfico 2: Entrada Analógica (Arduino)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

A tabela 2 apresenta os resultados obtidos nos sensores digitais e analógicos respectivamente no programa I, II e III.

Tabela 2: Dados dos sensores digitais/analógicos nos programas

Resultados	Nome do Sensor	Tipo de Entrada	Média da variação do tempo ($10^{-6}s$)
Programa I	Sensor de Vibração SW-18010P	Digital	Digital: 1326 μs Analógico: 1770 μs
Programa II	Acelerômetro e Giroscópio MPU-5060	Analógico	Eixo X: 1028 μs Eixo Y: 1030 μs Eixo Z: 1028 μs
	Sensor de Toque e Batida KY-031	Digital Analógico	Digital: 6 μs
	Sensor Detector de Som/Ruído KY-038	Digital	Digital: 6 μs Analógico: 112 μs
	Sensor de Movimento SW-420	Digital	Digital: 6 μs
	Sensor de Vibração SW-18010P	Digital Analógico	Digital: 6 μs Analógico: 112 μs
	Piezoelétrico	Digital	Digital: 6 μs
	<u>PiezoBuzzer</u>	Digital Analógico	Digital: 6 μs Analógico: 112 μs
Programa III	Sensor de Vibração SW-18010P	Digital	Digital: 6 μs

Fonte: Elaborada pelo Autor (2023)

No início do trabalho, esperava-se que sensores analógicos, principalmente o sensor acelerômetro e giroscópio MPU-5060 fosse o melhor para medir a velocidade do som nos materiais, contudo os resultados mostraram que dentre todos os sensores de vibração e de som estudados, obteve o pior resultado na média na variação do tempo, mesmo que seja possível realizar o estudo das medidas nos três eixos (x, y, z). Nesse caso, não só o sensor MPU-5060, mas também sensores que tinham o analógico não serviriam para a pesquisa em decorrência de serem 18 vezes mais lentos quando em comparação com o sensor digital ($\frac{6\mu s}{112\mu s}$), que possui um tempo de resposta muito menor do que o analógico.

Na tabela 2, nota-se que quando a medida não é previamente armazenada em uma variável, o tempo na detecção do sinal é significativamente maior devido ao comando Serial print, cuja

demora é por causa do tempo necessário para o envio de dados para o computador e na exibição do serial monitor. Contudo, quando o programa apresenta a gravação em uma variável, o tempo diminui de maneira significativa. Além do mais, o comando PIND apresenta uma precisão que está na faixa dos $6\mu s$, similar ao comando DigitalRead e, portanto, foi desconsiderado para a pesquisa. Inicialmente, considerou-se o uso de um giroscópio ou outro sensor analógico, pois permitiriam a visualização do formato da onda, todavia, verificou-se que a precisão do tempo era de $112\mu s$, também inviável para o trabalho. Esse valor, ao ser comparado com tempos típicos de percurso de ondas sonoras em barras ($300 - 1000\mu s$), mostrou-se em uma escala de tempo muito grande para medições precisas. Dessa forma, foi escolhido o uso de sensores digitais, por oferecerem uma precisão na medida do tempo bem maior do que nos sensores analógicos, viabilizando mais para o presente estudo, com enfoque na medição da velocidade do som.

b. Tempo de resposta dos sensores Digitais: Sensor Piezo Buzzer, sensor Piezoelétrico e sensor KY-038, sensor SW-18010P e sensor 801S.

Nesta etapa, foi avaliado o tempo de resposta dos seguintes sensores com o sinal digital: Sensor Piezo Buzzer, sensor Piezoelétrico e sensor KY-038, sensor SW-18010P e sensor 801S. Os sensores foram posicionados lado a lado sobre a peça de Cerâmica, como o Piezo Buzzer teve o melhor tempo de resposta que os demais, foi utilizado como referência.

É importante salientar a indicação no uso do Piezo Buzzer no lugar do piezoelétrico transdutor (padrão) devido a solda do último soltar no andamento das medidas, veja quadro 1, outro fato é a grande fragilidade em batidas sejam transversais ou longitudinais. Como o sensor Piezo Buzzer é acoplado em um plástico, além dos terminais de soldagem estarem fixados na caixa plástica e a intensidade do sinal ser maior que o do piezoelétrico, acabou por ser escolhido como o sensor para o estudo da propagação de ondas em sólidos dentro dos parâmetros estabelecidos no trabalho.

A figura 13 apresenta a medida do tempo de resposta para o sensor digital SW-18010P, curva azul, em relação ao Piezo Buzzer, curva amarela. A medida inicia $1408\mu s$ depois. ΔT (variação do tempo) mostrada no gráfico, no canto superior direito, revela o tempo medido pelo osciloscópio entre os dois traços amarelos que foram ajustados justamente no início, quando a

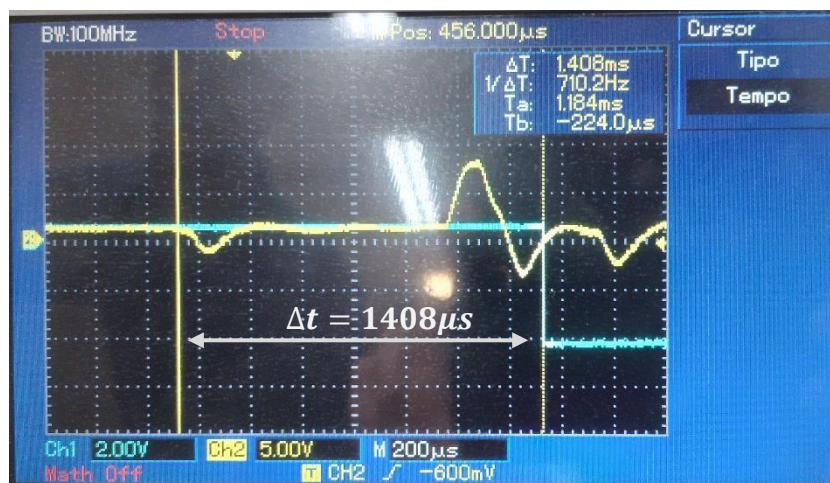
curva amarela deixa o nível inicial. Então, o sensor Piezo Buzzer detecta a batida até em dado momento da detecção pelo sensor SW-18010P do sinal na extremidade oposta da barra, curva azul.

Figura 12: Montagem experimental com a cerâmica (Sensor Piezo Buzzer e SW-18010P)



Fonte: Autor (2023)

Figura 13: Comparação de precisão entre os sensores Piezo Buzzer e SW-18010P



Fonte: Autor (2023)

No decorrer do experimento do tempo de resposta dos sensores, as medidas foram realizadas simultaneamente com o Arduino e o com osciloscópio. Entretanto, a montagem foi

realizada de acordo com as figuras 1 e 13. Contudo, a tabela 5 mostra os valores obtidos acerca do tempo de retardo dos sensores em relação ao Piezo Buzzer.

Tabela 5: Tempo de resposta dos sensores

Sensores de vibração e som		Tempo de retardado em relação ao Piezo Buzzer	
Canal 1 (Osciloscópio)	Canal 2 (Osciloscópio)	Osciloscópio	Arduino
Piezo Buzzer	KY-038	68 μs	68 μs
Piezo Buzzer	801S	872 μs	872 μs
Piezo Buzzer	SW-18010P	1408 ms	1408 ms
Piezo Buzzer	Piezo Buzzer	$\pm 0 \mu s$	$\pm 0 \mu s$

Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

De forma geral, os dados mostrados na tabela 5 evidenciam que, o sensor SW-18010P possui um tempo de retardo muito grande, ou seja, há uma demora significativa para detectar a vibração para o início da medida do tempo. Dentre os sensores, o Piezo Buzzer foi confirmado como o melhor sensor, quanto ao tempo de retardo ser “praticamente 0”. Em análise dos conjuntos de sensores avaliados, o que melhor atende aos critérios do tempo de resposta do trabalho são os dois sensores Piezo Buzzer, cujo tempo de retardado é baixo, na faixa da ordem de precisão da medida com sensores analógicos do Arduino, 6 μs .

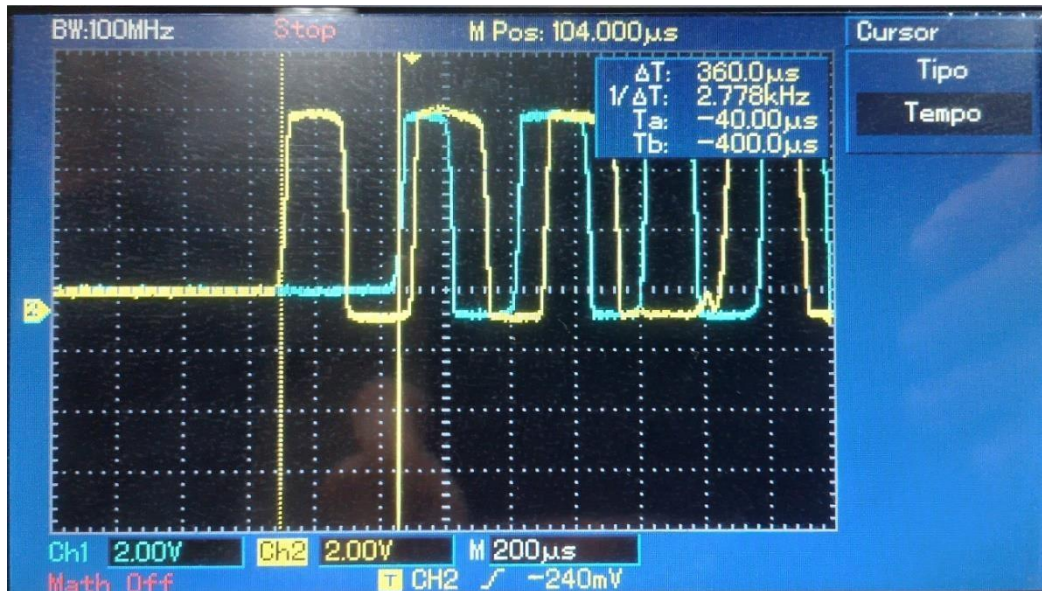
c. Medindo a velocidade do som em sólidos com o Arduino

Desta forma, para a medida de velocidade do som com o Arduino, foram utilizados 2 sensores Piezo Buzzer posicionados em cada extremidade da barra em paralelo com osciloscópio, que serviu como validação das medidas. Assim, podemos prosseguir com o estudo de propagação de ondas em sólidos com o programa desenvolvido na IDE no Arduino que mede a velocidade do som nos materiais sólidos em conjunto como osciloscópio.

Vale ressaltar que a montagem foi realizada de acordo com a figura 11 do item 1.c. Com isto, a figura 14 mostra na tela do osciloscópio o tempo referente a medida da velocidade do som para a barra de 1,8m. Se considerado o diâmetro do Piezo Buzzer de aproximadamente 2cm, logo

o tamanho da barra deve ser reduzido em cerca de 0,02 m. A variação do tempo encontrada de 360 μs é a diferença do tempo entre os sensores, visto que o segundo sensor na extremidade da barra começa a medir no momento que o pulso é refletido.

Figura 14: Variação do tempo na barra de aço de 180cm



Fonte: Autor (2023).

O comprimento efetivo da barra na medida é $D = 1,78$ m e o cálculo do erro experimental na medida da distância é estimado em $\Delta D = 0,01$ m, considerando o diâmetro 0,02 m do sensor PeizoBuzzer. Abaixo é apresentado o cálculo do erro experimental do Arduino e do Osciloscópio.

Arduino

$$h(\text{barra de aço 304}) = 1,78m$$

$$\Delta t = 360 \times 10^{-6}s$$

$$\text{Erro}(\Delta T) = 13 \times 10^{-6}s$$

$$V_{som_{aço}} = \frac{1,78m}{360} \times 10^{-6s} \cong 4,944 \pm 206 \text{ m/s}$$

$$\text{Erro experimental} = v \left(\frac{\Delta D}{D} + \frac{\Delta t}{t} \right) \cong 4944,4 \times \left(\frac{0,01}{1,78} + \frac{13 \times 10^{-6s}}{360 \times 10^{-6s}} \right) = 206 \text{ m/s}$$

Osciloscópio

$$h(\text{barra de aço 304}) = 1,78m$$

$$\Delta t = 360 \times 10^{-6}s$$

$$Erro(\Delta T) = 200 \times \frac{10^{-6}s}{10} \times \frac{1}{2} = 10 \times 10^{-6}s$$

$$V_{som_{aço}} = \frac{1,78m}{360} \times 10^{-6} \cong 4,944$$

$$Erro_{experimental} = v \left(\frac{\Delta D}{D} + \frac{\Delta t}{t} \right) \cong 4944,4 \times \left(\frac{0,01}{1,78} + \frac{20 \times 10^{-6}}{360 \times 10^{-6}} \right) = 302,46 \text{ m/s}$$

A tabela 6 resume os resultados para vários materiais. Por isto, os resultados mostraram que os valores obtidos para a velocidade do som nos sólidos pelo osciloscópio e pelo Arduino são coerentes e a variação do tempo semelhantes, conforme foram descritos na tabela 6. Isso se deve ao fato de que o erro do Arduino está em torno de $13 \mu s$, que é similar ao erro de os $20 \mu s$ apresentado do osciloscópio na escala de $200 \mu s$. Como a variação do tempo é o que determina o erro da medida, trabalhar com escalas menores como $100 \mu s$ ou $50 \mu s$ diminuiria muito o erro experimental da velocidade do som medida pelo osciloscópio. A escala de $200 \mu s$ foi escolhida de modo que o erro experimental na medida realizada com o osciloscópio fosse próximo ao erro experimental na medida realizada pelo Arduino.

Tabela 6: Resultados da velocidade do som obtidos dos materiais sólidos no *software* Audacity e no Osciloscópio

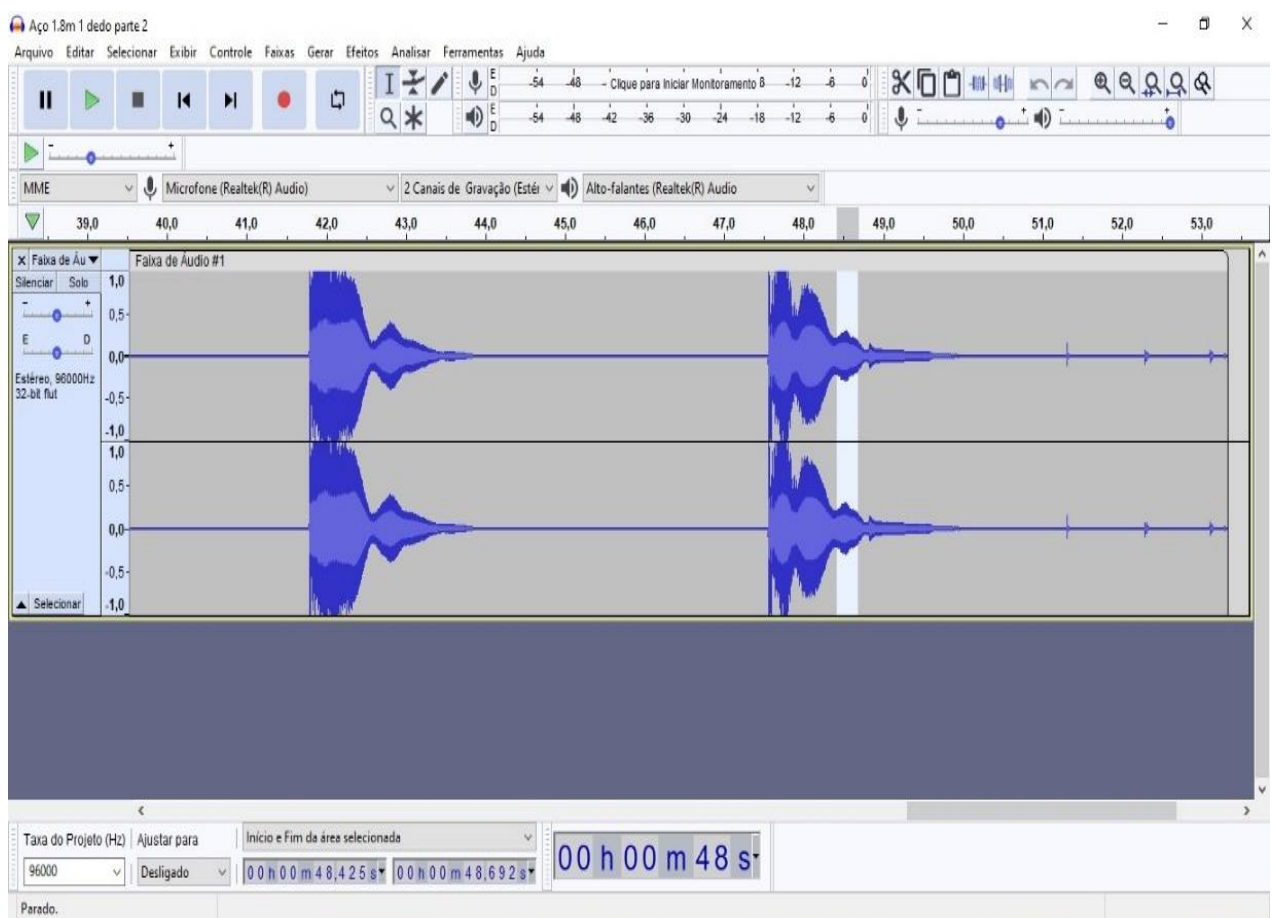
Materiais	C (m)	Δt no Osciloscópio (μs)	Δt no Arduino (μs)	V_{som} osciloscópio (m/s x 10^2)	V_{som} Arduino (m/s x 10^2)
Barra de aço 304	1,78	360	360	49 ± 3	49 ± 2
Barra de aço 301	1,00	354	354	52 ± 3	52 ± 2
	0,80	384	384	51 ± 4	51 ± 3
Barra de alumínio	0,69	264	264	51 ± 4	51 ± 2
Cano PVC	1,00	520	520	38 ± 3	38 ± 2
Granito	0,79	166	166	47 ± 6	47 ± 4

Fonte: Autor (2023).

d. Ressonância

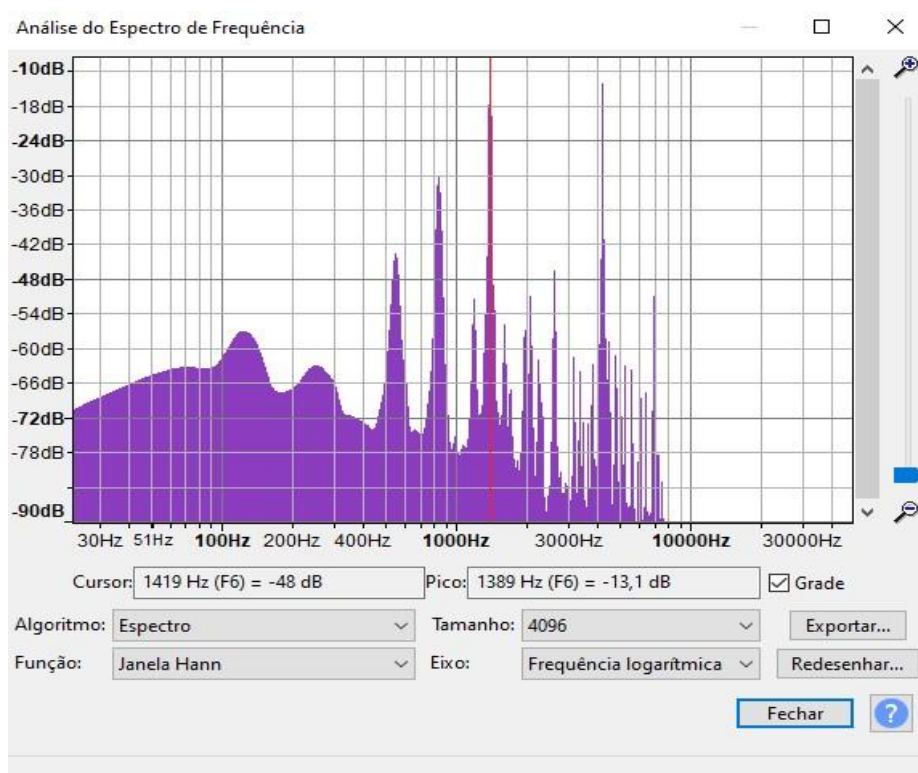
As medidas realizadas conforme item 2.b retratam este fenômeno. A partir do fenômeno da ressonância das barras no *software* Audacity ilustradas na tabela 6 foi medido a velocidade do som pelo espectro de frequência (transformada de Fourier). Além disso, são estudados 2 tipos de aço diferentes, para o aço do tamanho maior é do tipo 304 nas figuras 15 e 16, enquanto os outros são o aço normal.

Figura 15: Gravação da barra de 1,8m com 1 dedo



Fonte: Autor (2023).

Figura 16: Primeiro modo de vibração da barra de 1,8m (maior pico)



Fonte: Autor (2023).

Tabela 7: Velocidade do som utilizando Audacity

Medidas da velocidade sonora em sólidos (Ressonância – ondas estacionárias)			
Materiais	C (m)	Velocidade do som ($v_n = \lambda \times f$) m/s	
		1º harmônico	2º harmônico
Barra de aço 304	1,80	$1389 \times 2 \times 1,8 = 5000$	$2693 \times 1,8 = 4847$
Barra de aço 301	1,00	$2629 \times 2 \times 1,0 = 5258$	$5150 \times 1,0 = 5150$
	0,50	$5135 \times 2 \times 0,5 = 5135$	$10244 \times 0,5 = 5122$
Barra de alumínio	0,69	$3704 \times 2 \times 0,67 = 4994$	$7142 \times 0,67 = 4785$

Fonte: Autor (2023).

A partir do fenômeno da ressonância das barras no *software* Audacity, ilustradas na tabela 7, foi medida a velocidade do som pelo espectro de frequência (transformada de Fourier). Além disso, são estudados 2 tipos de aço diferentes, para o aço do comprimento maior é do tipo 304 e o de tamanho comprimento, o aço 301.

A determinação da medida foi trabalhada em função do 1º e 2º que são os maiores picos de ondas apresentados no espectro de frequência, em cada caso, por se tratar de um tubo fechado, utilizando a equação 3 do referencial teórico, é possível obter a velocidade do som nos materiais que serviram como ferramenta para confirmar os resultados obtidos com o Arduino.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa mostrou que o Arduino possibilita a produção de inúmeros projetos inovadores para uso no ensino de Ciências. Dessa forma, a inclusão do Arduino como objeto de pesquisa no estudo de propagação de ondas em sólidos com a aplicação da metodologia “chave e disparo” proposto por Souza (2020), foi fundamental para o desenvolvimento do trabalho não só para a análise da precisão dos sinais digitais e/ou analógicos, no tempo de resposta e na sensibilidade dos sensores, como também na validação dos resultados.

A metodologia desenvolvida possibilitou a obtenção na prática da velocidade do som dos materiais sólidos, bem como a observação dos resultados e a comparação com os valores encontrados na literatura. Diante disto, os critérios utilizados no método serviram de base para determinar a velocidade do som nos materiais com o auxílio desta tecnologia.

Os resultados mostrados nas medidas da velocidade do som do Arduino foram validados por dois métodos: o *software* Audacity e o Osciloscópio digital do modelo MVB- DSO 1100, no modo pulso. Observou-se que os resultados apresentados nas tabelas para os metais não apresentaram diferenças significativas.

As medidas de comparação da velocidade do som encontradas no Arduino e tanto no Audacity quanto no osciloscópio conferem com o que é evidenciado na literatura, com o primeiro apresentando menor erro experimental e maior precisão.

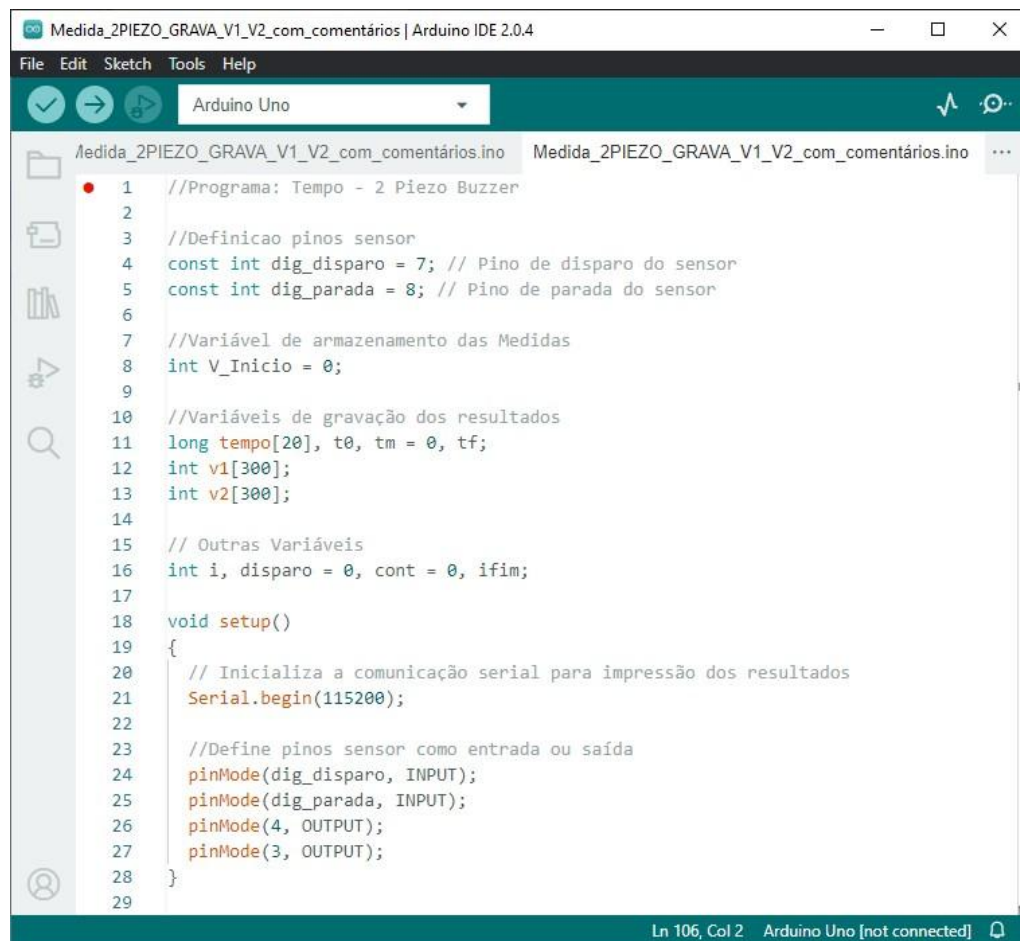
Mediante aos fatos citados, uma proposta interessante no ensino de Ciências, é o potencial da barra ser usada como recurso didático (pelo método III.2.b) da Ressonância como alternativa para dinamização da aula, permitindo com que os discentes possam compreender de maneira facilitada os conhecimentos científicos no estudo do fenômeno da ressonância e aplicá-lo na prática.

Outra forma de utilização como recurso didático para o ensino de Ciências foi sugerida pelo técnico do laboratório. A partir de um sensor piezzoelétrico conectado ao osciloscópio,

quando fixado com fita adesiva, auxilia na detecção precisa da frequência de ressonância das ondas estacionárias em Placas de Chladni.

8. ANEXOS

Anexo 1: Programa que realiza as medições do intervalo do tempo e a velocidade do som no material sólido.



```
Medida_2PIEZO_GRAVA_V1_V2_com_comentários | Arduino IDE 2.0.4
File Edit Sketch Tools Help
Arduíno Uno
Medida_2PIEZO_GRAVA_V1_V2_com_comentários.ino Medida_2PIEZO_GRAVA_V1_V2_com_comentários.ino ...
1 //Programa: Tempo - 2 Piezo Buzzer
2
3 //Definicao pinos sensor
4 const int dig_disparo = 7; // Pino de disparo do sensor
5 const int dig_parada = 8; // Pino de parada do sensor
6
7 //Variável de armazenamento das Medidas
8 int V_Inicio = 0;
9
10 //Variáveis de gravação dos resultados
11 long tempo[20], t0, tm = 0, tf;
12 int v1[300];
13 int v2[300];
14
15 // Outras Variáveis
16 int i, disparo = 0, cont = 0, ifim;
17
18 void setup()
19 {
20   // Inicializa a comunicação serial para impressão dos resultados
21   Serial.begin(115200);
22
23   //Define pinos sensor como entrada ou saída
24   pinMode(dig_disparo, INPUT);
25   pinMode(dig_parada, INPUT);
26   pinMode(4, OUTPUT);
27   pinMode(3, OUTPUT);
28 }
29
Ln 106, Col 2 Arduíno Uno [not connected]
```



```
30 void loop()
31 {
32   V_Inicio = digitalRead(dig_disparo); // Lê o estado do pino de disparo do sensor
33   t0 = micros(); // Armazena o tempo atual em microssegundos
34
35   //Serial.print (" ");
36   //Serial.print(disparo);
37   //Serial.print (" ");
38   //Serial.println(V_Inicio);
39
40   // Verifica se o pino de disparo foi acionado e se o disparo está desativado
41   if (V_Inicio > 0 && disparo == 0)
42   {
43     disparo = 1; // Ativa o disparo
44   }
45
46   if (disparo == 1)
47   {
48     for (int i = 0; i < 300; i++)
49     {
50       v1[i] = digitalRead(dig_disparo); // Lê o estado do pino de disparo
51       v2[i] = digitalRead(dig_parada); // Lê o estado do pino de parada
52
53       // Verifica se o pino de parada foi acionado e se o contador está desativado
54       if (v2[i] == 1 && cont == 0)
55       {
56         tf = micros(); // Armazena o tempo atual em microssegundos
57         ifim = i;
58         cont = 1;
59       }
60     }
61   }
62 }
```

Ln 106, Col 2 Arduino Uno [not connected]

```
60
61     if (i < 20)
62     {
63         tempo[i] = micros(); // Armazena o tempo atual em microssegundos
64     }
65
66     //delayMicroseconds(20);
67 }
68
69 // Impressão dos resultados
70 for (int i = 0; i < 20; i++)
71 {
72     Serial.print(" ");
73     Serial.print(i);
74     Serial.print(" ");
75     Serial.println(tempo[i]);
76     if (i < 19)
77     {
78         // Calcula o tempo médio entre as medições
79         tm = tm + (tempo[i + 1] - tempo[i]);
80     }
81 }
82
83 for (int i = 0; i < 300; i++)
84 {
85     //Impressões dos valores das variáveis
86     Serial.print(" ");
87     Serial.print(i);
88     Serial.print(" ");
89     Serial.print(v1[i]);
90     Serial.print(" ");
91     Serial.println(v2[i]);
92 }
93
94 Serial.print(" ifim ");
95 Serial.print(ifim);
96 Serial.print(" tm ");
97 Serial.print(tm / 19); // Calcula o tempo médio entre as medições
98 Serial.print(" DT = ");
99 Serial.println(tf - t0); // Calcula o tempo total de execução
100
101 //Medidas de controle de impressão dos resultados do sinal
102 disparo = 0; // Desativa o disparo
103 cont = 0; //Desativa o contador
104 tm = 0;
105 }
106
```

Fonte: Elaborado pelo autor (Arduino Uno, 2023).

9. REFERÊNCIAS

ARDUINO. *Referência de linguagem Arduino*. 2005. Disponível em: <<https://docs.arduino.cc/language-reference/pt/>>. Acesso em: 1 abr. 2023.

CAVALCANTE, M. A., TAVOLARO, C. R. C.; MOLISANI, E. **Física com Arduino para iniciantes**. *Revista Brasileira de Ensino de Física* [online]. 2011, v. 33, n. 4. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1806-11172011000400018>>. Acesso em: 05 jun. 2023.

ENGINEERING TOOLBOX. *Sound speed in solids*. Disponível em: <https://www.engineeringtoolbox.com/sound-speed-solids-d_713.html>. Acesso em: 06 jun. 2023.

FRANÇA, M. V. S. De. et. al. **Aulas experimentais como subsídio para o ensino de física**. Anais do V CONAPESC. Campina Grande: Realize Editora, 2020. Disponível em: <<https://editorarealize.com.br/artigo/visualizar/72943>>. Acesso em: 16 set. 2022.

FECHINE, Joseana Macêdo. **Ciclo de Seminários Técnicos: a transformada de fourier e suas aplicações**. [S.L.]: Grupo Pet Computação, 2006. 56 slides, color. Disponível em: <http://www.dsc.ufcg.edu.br/~pet/ciclo_seminarios/tecnicos/2010/TransformadaDeFourier.pdf>. Acesso em: 12 out. 2023.

HEWITT, P. G. *Física - Se um átomo fosse do tamanho de um campus*. 11. ed. São Paulo: Pearson, 2015. Disponível em: <<https://zonadaeletrica.com.br/fisica-conceitual-12a-ed-paul-hewitt/>>. Acesso em: 17 set. 2022.

MALONEY, D. *Simple setup answers complex question on the physics of solids*. Hackaday, 1 fev. 2022. Disponível em: <<https://hackaday.com/2022/02/01/simple-setup-answers-complex-question-on-the-physics-of-solids/>>. Acesso em: 1 abr. 2025.

MARTINAZZO, C. A. *et al.* **Arduino: Uma tecnologia no ensino de física**. Perspectiva: Erechim, Brasil, v. 38, n. 143, p. 21-30, 21 jul. 2014. Disponível em: <<https://www.perspectiva.uern.br/artigos/Arduino.pdf>>. Acesso em: 27 jun. 2022.

MINIPA. *Manual do osciloscópio digital MVB-DSO-1100*. 1. ed. 2013. Disponível em: <<https://www.minipa.com.br/images/Manual/MVB-DSO-1100-BR.pdf>>. Acesso em: 06 jun. 2023.

MOREIRA, M. P. C.; ROMEU, M. C.; ALVES, F. R. V.; DA SILVA, F. R. O. **Contribuições do Arduino no Ensino de Física: uma revisão sistemática de publicações na área do ensino**. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 35, n. 3, p. 721-745, dez. 2018. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/cbe/article/view/85641>>. Acesso em: 29 jun. 2022.

RODRIGUES, C. G. **Ondas, acústica, psicoacústica e umidade sonora**. 2020. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/343431173_Ondas_Acustica_Psicoacustica_e_Poluicao_Sonora>. Acesso em: 06 jun. 2023.

PATSKO, L. F. **TUTORIAL: Aplicações, Funcionamento e Utilização de Sensores**. 2006. Disponível em: <https://www.maxwellbohr.com.br/downloads/robotica/mec1000_kdr5000/tutorial_eletronica_aplicacoes_e_funcionamento_de_sensores.pdf>. Acesso em: 06 jun. 2023.

PIZZETA, D. C.; WANDERLEY, A. B.; MASTELARO, V. R.; PAIVA, F. F. **Uma avaliação experimental do tubo de ondas sonoras estacionárias**. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 39, n. 3, p. e3301, 2017. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rbef/a/mYWbPJgpdq9TCgXdf6RCS5s/>>. Acesso em: 1 abr. 2022.

SANTOS, A. C. F.; FONTES A. C.; AGUIAR, C. E. **Ondas e Terremotos**. *Scientific American Brasil: Aula Aberta* 7, v. 12, p. 56-57, 2012. Disponível em: <https://www.if.ufrj.br/~carlos/artigos/SciAm2012_ondas_terremotos.pdf>. Acesso em: 23 jun. 2023.

SANTOS, H. M. **Construção de um sensor de vibrações mecânicas e ondas sonoras com a utilização de Arduinos para a aplicação no ensino de Ciências**. 25º CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNB E 16º DO DF 2019. Disponível em: <<https://conferencias.unb.br/index.php/iniciacaocientifica/25CICUnB16df/paper/view/19035>>. Acesso em: 29 jun. 2023.

SILVEIRA, S; GERARDI, M. **Desenvolvimento de um kit experimental com Arduino para o ensino de Física Moderna no Ensino Médio**. Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá, SC, Brasil, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 2017. p 1- 7. Disponível em: <https://www.rbef.ufsc.br/artigos/kit_arduino_fisica_modern_ensino.pdf>. Acesso em: 16 jun. 2023.

SOUSA, I. V. De. *et al.* **Física experimental com Arduino: ondas em uma corda tensionada**. *Revista Brasileira de Ensino de Física* [online]. 2020, v. 42, e20200177. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2020-0177>>. Acesso em: 06 jun. 2023.

SOUZA, A. R. De. *et al.* **A placa Arduino: uma opção de baixo custo para experiências de física assistidas pelo PC**. *Revista Brasileira de Ensino de Física* [online]. 2011, v. 33, n. 1, pp. 01-05. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1806-11172011000100026>>. Acesso em: 06 jun. 2023.

SOUZA, D. B. De.; ARAÚJO, J. W. B. De; KAKUNO, E. M. **Velocidade do som em metais pelo método do tempo de voo**. *Revista Brasileira de Ensino de Física* [online].

2020, v. 42. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2020-0164>>. Acesso em: 09 jun. 2023.

VARANIS, M. et al. **Instrumentação para análise de vibrações mecânicas nos domínios do tempo e da frequência utilizando a plataforma Arduino.** Revista Brasileira de Ensino de Física [online]. 2016, v. 38, n. 1, Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1806-11173812063>>. Acesso em: 06 jun. 2023.