

Material Suplementar para “Medida da velocidade do som em sólidos: o desafio de medir microssegundos no laboratório escolar”

Apêndice B: Medida do tempo de resposta de sensores digitais de som e vibração.

Na medida da velocidade do som em sólidos, um ponto fundamental para o sucesso do experimento é a seleção do sensor de vibração mais adequado, o que possui menor tempo de resposta. Foram avaliados os tempos de resposta dos seguintes sensores de vibração com saída digital: *SW-420*, *SW-18010P*, *801S* e o piezo buzzer. Os sensores, com a sensibilidade ajustada, foram comparados aos pares. A Fig. B1 mostra a montagem para a medida do tempo de resposta, onde dois sensores digitais, conectados às saídas digitais do Arduino, estão fixados firmemente, lado a lado, com fita adesiva, sobre uma peça de porcelanato de 9 cm x 45 cm. A peça é apoiada em tubos de látex para evitar que vibrações indesejadas interfiram no experimento e permitir que a peça de porcelanato ressoe por mais tempo.

O sensor de referência é o piezo buzzer (+ resistor $\sim 1M\Omega$ como já comentado) pois apresenta menor tempo de resposta que os demais. Como mostrado na Tabela B1 e na Figura B1, o tempo de resposta do piezo buzzer é da ordem da precisão do Arduino, cerca de 4 μs por medida (ver Apêndice A). O osciloscópio conectado em paralelo reproduz o sinal analógico correspondente a medida digital que cada sensor realiza com o Arduino em tempo real, ou seja, a medida e a validação são realizadas ao mesmo tempo. Não se deve usar fita dupla face aqui, em especial as usadas para pendurar objetos, pois amortecem o sinal do sensor. O Programa 1, Apêndice C, guia as medidas, com o sensor de referência, piezo buzzer conectado à porta digital 7 e o sensor em estudo à porta digital 6.

O alvo em vermelho, desenhado na posição média entre o centro do piezo elétrico e do dispositivo oscilante do segundo sensor, *801S*, é o ponto onde deve-se realizar a batida firme com o cabo de plástico de uma chave de fenda para iniciar a medida, ver Fig. B1.

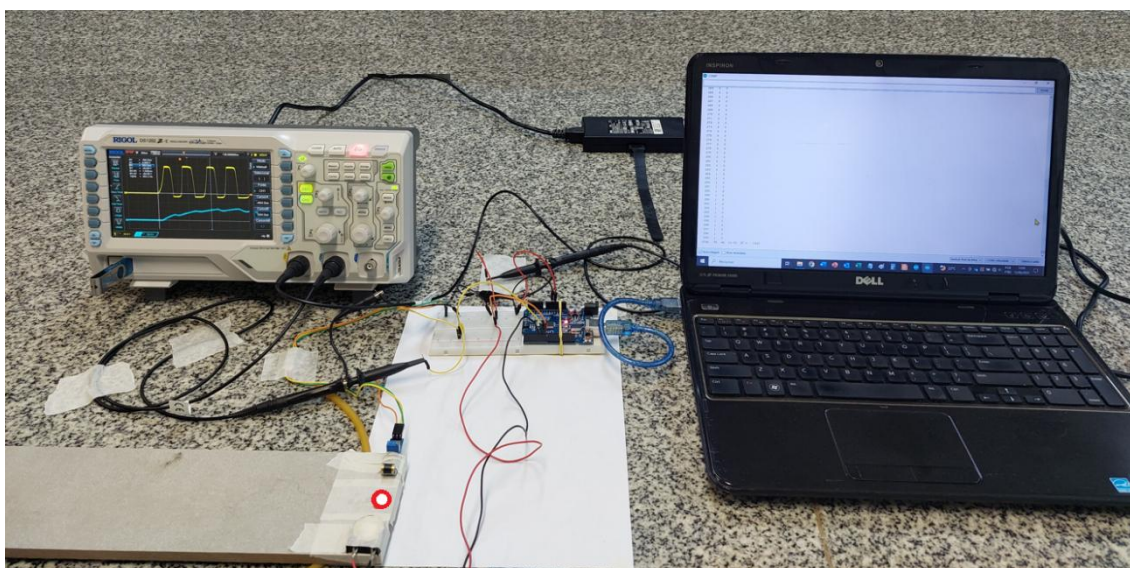


Figura B1: Montagem para medida do tempo de resposta. A imagem mostra o sensor piezo buzzer e o sensor *801S* fixados sobre a peça de porcelanato e as conexões com o Arduino e o notebook.

As três primeiras linhas da Tab. B1 apresentam os resultados para o tempo de resposta médio dos sensores *SW-420*, *SW-18010P* e *801S* em relação ao sensor piezo buzzer de referência. O atraso dos sensores digitais em relação ao de referência é de centenas de microssegundos, o que inviabiliza sua utilização em medidas da

velocidade do som em metais com o Arduino. A última linha mostra o desempenho de um segundo sensor piezo buzzer.

Tabela B1: Tempo de retardado médio em relação ao sensor de referência piezo buzzer ($10^1 \times \mu s$)

Sensores	Osciloscópio	Arduino
SW-420	76 ± 2	69 ± 2
801S	$0,4 \pm 1$	150 ± 4
SW-18010P	88 ± 3	81 ± 3
Piezo buzzer	$0,3 \pm 1$	$0,3 \pm 1$

As incertezas apresentadas na Tab. B1 referem-se a soma da incerteza instrumental com a incerteza padrão considerando uma média sobre 20 medidas. A incerteza instrumental do osciloscópio corresponde a variação na medida quando a posição dos cursores é alterada, de $4 \mu s$ na escala de $200 \mu s/div$. Como dois sensores são movimentados, a incerteza instrumental vale $4 \mu s \times 2 = 8 \mu s$. Já a incerteza instrumental do Arduino foi considerada como $8 \mu s$ para as duas medidas independentes (em tempos diferentes) realizadas.

Um aspecto relevante na análise do sinal no Arduino é a sensibilidade das entradas digitais à tensão. De acordo com a documentação de referência do Arduino [1], em placas que operam a 5 V, como o Arduino Uno, tensões entre 0 V e 1,5 V são interpretadas como “0”, valores entre 1,5 V e 3,0 V resultam em leitura indefinida e tensões entre 3,0 V e 5 V são registradas como “1”. Para obter medições quantitativas confiáveis da amplitude do sinal, é necessário calibrar os sensores às exigências do experimento, utilizando o potenciômetro quando disponível.

A Fig. B2 apresenta um conjunto de imagens da tela do osciloscópio com exemplos típicos de medidas do tempo de resposta realizadas simultaneamente no Arduino e no osciloscópio para os vários sensores. O traço amarelo mostra, em cada medida, a variação da voltagem no sensor piezo buzzer de referência conectado ao canal 1 do osciloscópio, capturada utilizando o modo de trigger do tipo pulso. Já o traço azul claro apresenta o sinal do sensor avaliado, conectado ao canal 2. Os resultados apresentados nas quatro imagens comprovam que para sensores digitais a resposta do piezo buzzer é mais rápida que a dos demais sensores, e validam as medidas realizadas para o tempo de resposta.

Nas figuras T_{osc} mede o intervalo de tempo entre a sensibilização inicial do canal 1 e no canal 2 do osciloscópio, momento em que a intensidade do sinal do sensor varia pela primeira vez em relação ao valor de referência. Dado que o Arduino só é sensibilizado para voltagens acima de 3 V, T_{Ard} mede o intervalo de tempo entre as posições em que a voltagem atinge precisamente 3 V nos dois canais do osciloscópio. Na figura os cursores horizontais foram ajustados de modo a ficarem precisamente a 3 V acima dos níveis de referência de cada sensor.

Para o sensor SW-420, os cursores verticais medem $T_{Ard} = 684 \mu s$, indicando a posição em que a voltagem atinge pela primeira vez o valor de 3 V em cada canal. A resposta do piezo buzzer ocorre um pouco antes, assim $T_{osc} = 758 \mu s$. No resultado para o sensor 801s observe que a sensibilização do sensor é “imediate”, o osciloscópio mede agora $T_{osc} \sim 0 \mu s$, mas a rampa de subida demanda $T_{Ard} = 1508 \mu s$ para atingir o nível necessário para sensibilizar a entrada digital do Arduino em 3 V. Para o sensor SW-18010P a resposta é abrupta, mas ocorre algumas centenas de microssegundos após a batida.

O sensor piezo buzzer mostra vantagens em relação a pastilha do piezoelétrico padrão, pois frequentemente a solda solta devido ao impacto das batidas, levando consigo uma parte do sensor junto, no caso do piezoelétrico, o que não acontece com o piezo buzzer, que tem terminais para soldagem dos cabos e é encapsulado em plástico. A caixa plástica permite ainda a persistência de sinais por mais tempo devido à ressonância. Com isso o sensor piezoelétrico foi descartado nesta etapa.

Mesmo para o sensor piezo buzzer a sensibilização da porta digital não é imediata, a análise das várias medidas aponta no sentido da sensibilização do Arduino acontecer no nível de referência de 3,0 V $\sim 7 \mu s$ depois da detecção da batida pelo osciloscópio, ou seja, o tempo de subida da curva do piezo buzzer até o nível de voltagem de 3 V.

A boa simetria entre as curvas no caso de dois sensores piezo buzzer permite considerar qualquer referência para realizar a medida. As medidas realizadas com dois sensores piezo buzzer oscilam entre zero e 4 μs , com poucas leituras de 8 μs , valor que está no limiar de precisão do relógio do Arduino. Destaca-se que a medida mostrada na Fig. B2 para o piezo buzzer foi selecionada a medida com o maior valor do tempo de resposta, para que a variação fosse perceptível. No quadro de destaque à direita, onde a escala é de 20 $\mu s/div$, a ampliação do máximo da curva destaca o tempo de 8 μs .



Figura B2: Tempos de resposta de sensores digitais, curva azul claro, em relação ao sensor de referência, curva amarela, o piezo buzzer.

De forma geral, os dados mostrados na Tab. B1 e na Fig. B2 evidenciam que existe uma grande diferença entre os tempos de resposta dos vários sensores que deve ser observada nos experimentos ou no uso para projetos que exijam grande precisão no tempo. Vale destacar que esse tempo é dependente da calibração da sensibilidade dos sensores, assim deve-se ajustar através dos parafusos específicos a sensibilidade antes de realizar as medidas experimentais de modo que o atraso seja o menor possível. No caso do piezo buzzer nenhum ajuste é necessário. Assim no desenvolvimento do artigo as medidas da velocidade do som em sólidos com o Arduino foram realizadas com dois sensores do tipo piezo buzzer.

Observe que para os demais sensores que não sejam o piezo buzzer a incerteza instrumental amplia a precisão de alguns microssegundos, no caso do piezo buzzer, para dezenas de microssegundos. O conjunto de medidas mostra uma grande coerência entre as medidas realizadas com o Arduino e com o osciloscópio.

Referências

[1] ARDUINO, *HIGH | LOW*, disponível em: <https://docs.arduino.cc/language-reference/pt/variáveis/constants/highLow/>, acessado em: 20/10/2025.