

.....

### Tiago Destéffani Admiral

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física, Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil.

#### RESUMO

Mesmo sendo um equipamento muito útil, infelizmente um osciloscópio tem um custo extremamente alto e, por essa razão, não é encontrado com frequência nos laboratórios de física das escolas. Este artigo apresenta um protótipo de osciloscópio de simples construção, compacto, e de baixo custo, utilizando um smartphone ou tablet. Para testar sua funcionalidade, utilizamos um transdutor piezoelétrico para converter ondas sonoras em sinais elétricos. Os resultados mostraram que o protótipo é capaz realizar medidas de sinais elétricos com boa precisão, mostrando na tela do smartphone um sinal coerente com as características de entrada, podendo ser utilizado para abordar diversos conceitos envolvidos nos fenômenos ondulatórios. A construção e utilização do protótipo é uma excelente oportunidade para aprender um pouco mais, e ensinar aos alunos, tanto sobre o funcionamento de um osciloscópio, quanto sobre o fenômeno da piezoeletricidade.

**Palavras-chave:** ensino de física; osciloscópio; piezoeletricidade

.....

## 1. Introdução

Embora seja um assunto recorrente, ainda temos que lidar com uma grande dificuldade no ensino de física: a falta de laboratórios nas escolas. Mesmo em escolas que oferecem espaços físicos destinados ao laboratório, ainda existe o problema da ausência de equipamentos importantes para realizar determinados tipos de experimentos [1].

Alguns equipamentos de utilização laboratorial apresentam custo elevado, como é o caso do osciloscópio. O custo médio atual de um osciloscópio pode variar entre alguns milhares a algumas dezenas de milhares de reais, dependendo do modelo. O osciloscópio é um equipamento que nos permite analisar detalhadamente as características de um sinal elétrico, fornecendo-nos informações como amplitude, frequência, possíveis perturbações e interferências, entre outras características. Entre as saídas para contornar a falta de equipamentos como esse, destacam-se os esforços para realizar adaptações de experimentos de baixo custo.

Para que seja bem sucedido, um experimento de baixo custo deve levar muitos fatores em consideração, a aplicabilidade do protótipo, as limitações dos equipamentos, possíveis fontes de distorções e/ou inconsistências nas leituras, entre outros. Mas a ideia geral é que se consiga reproduzir, em alguma escala, a medição e a interpretação do fenômeno que precisaria de um equipamento mais caro para ser observado [2].

Vários professores [3, 4] já estão desenvolvendo soluções para facilitar o

acesso dos alunos a experimentos, que antes não seriam possíveis sem esses equipamentos de baixo custo. Entretanto, ao buscar nas principais revistas de ensino de física, não encontramos muitos trabalhos que se dedicaram a realizar experimentos de baixo custo envolvendo osciloscópio [5, 6].

Assim este artigo descreve um protótipo para montagem de um osciloscópio simples, que utiliza alguns componentes de baixo custo, associado a um aplicativo de *smartphone*. Como protótipo, fomos capazes de captar uma onda

**Mesmo em escolas que oferecem espaços físicos destinados ao laboratório, ainda existe o problema da ausência de equipamentos importantes para realizar determinados tipos de experimentos**

sonora que, convertida em sinal elétrico pelo transdutor piezoelétrico, foi lida pelo osciloscópio no celular. Isso nos permitiu calcular com boa precisão a frequência da onda sonora que gerou o sinal

e também observar o fenômeno da piezoeletricidade. Entretanto, existem mais possibilidades para que o protótipo contemple diversos outros conceitos relacionados aos fenômenos ondulatórios.

### 1.1. Piezoeletricidade

Na literatura [7], encontramos a definição de piezoeletricidade como a propriedade que alguns dielétricos têm de desenvolver uma polarização ao serem submetidos a uma tensão mecânica. Na prática, ao submeter um material com essa característica a uma tensão mecânica, a polarização resulta na criação de um campo elétrico interno no material, gerando uma diferença de potencial elétrico entre alguns pontos do mesmo.

Existe uma simetria no fenômeno de piezoeletricidade, no sentido de que

se submetermos um material piezoelétrico a uma diferença de potencial ele também responderá com uma deformação mecânica, proporcional à diferença de potencial à qual foi submetido. Esse fenômeno pode ser entendido a partir da compreensão de como uma deformação mecânica influencia no momento de dipolo molecular do material piezoelétrico, como mostra a Fig. 1.

A Fig. 1 é um esquema bidimensional no qual podemos observar que na situação de equilíbrio (a), os três dipolos formados pelo íon A e seus vizinhos (cada carga  $\pm e$  é repartida em três) apresenta momento total nulo. Já na imagem (b), percebe-se que a compressão mecânica causa uma ligeira alteração nos ângulos entre os dipolos, o que origina uma resultante de momento de dipolo na direção da deformação [7].

Deve-se ressaltar que a ordem de grandeza desse campo elétrico é extremamente pequena, necessitando de amplificação para detecção. Por essa razão, grande parte dos materiais piezoelétricos são utilizados em aplicações como construção de microfones ou cápsulas que podem reproduzir sons de baixa intensidade. Nessa segunda aplicação, em particular, o transdutor é submetido a um sinal elétrico com determinada frequência e, em resposta, produz deformações mecânicas em sua superfície com a mesma frequência e com amplitude proporcional à do sinal elétrico. Essa resposta mecânica induzida no transdutor produz uma perturbação mecânica longitudinal no ar em contato com o material, resultando na frente de onda sonora. A Fig.2 mostra um transdutor piezoelétrico.

O tipo de encapsulamento mostrado na Fig. 2 é extremamente comum em diversas aplicações do transdutor

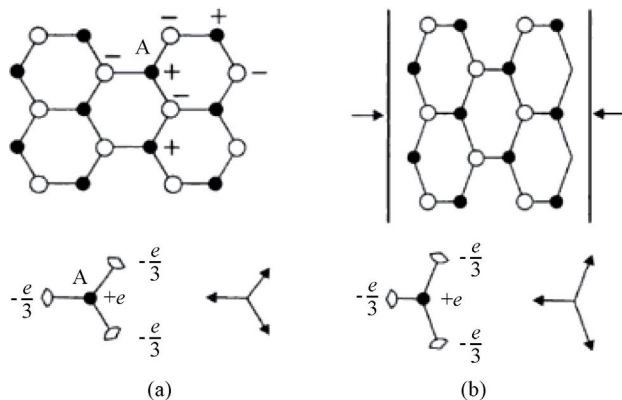


Figura 1 - Origem da piezoelectricidade. (a) Momento de dipolo elétrico total nulo devido ao equilíbrio; (b) Momento de dipolo diferente de zero devido à deformação mecânica [7].

piezoelétrico, esse tipo de componente é encontrado com frequência em brinquedos que emitem sons. Os sinais (+) e (-) na Fig. 2 indicam a polaridade do transdutor. Para que ele reproduza uma deformação mecânica, com a mesma frequência do sinal elétrico, o polo positivo deve ser conectado na parte central do material e o positivo na parte metálica externa.

### 1.2. Osciloscópio

Os primeiros osciloscópios funcionavam por meio de um tubo de raios catódicos, porém atualmente o tipo mais comum é o osciloscópio digital. É um equipamento utilizado tanto para fins didáticos quanto industriais e é muito útil para analisar sinais elétricos, sendo capaz de dividir um sinal contínuo em quantidades temporalmente discretas através de um conversor analógico/digital. Essas informações são armazenadas e processadas, sendo apresentadas em uma tela (geralmente de cristal líquido) em tempo real [8].

Além dessas funcionalidades, um osciloscópio geralmente pode ser usado simultaneamente para ler mais de um sinal elétrico, dependendo do número de canais que possui o que faz dele uma excelente ferramenta para comparar intensidades e defasagem de sinais elétricos em intervalos de tempo desejados. Um exemplo de osciloscópio digital é mostrado na Fig.3.

O osciloscópio é frequentemente utilizado em experimentos de física que envolvem circuitos eletrônicos, por sua versatilidade na leitura de uma grande gama de frequências de sinais elétricos. O que determina o limite da frequência máxima que pode ser lida por um osciloscópio é a característica chamada de largura de banda (*band width*). Por con-

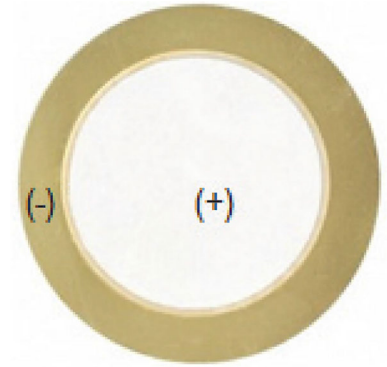


Figura 2 - Transdutor piezoelétrico, geralmente utilizado para produzir sinais sonoros de baixa intensidade.

venção, a largura de banda é a frequência em que a amplitude do sinal desenhado é reduzida para 70.7% da amplitude do sinal (sinusoidal) de entrada [8]. No caso de nosso protótipo, utilizaremos a resolução limite disponibilizada pelo aplicativo, o qual nos permite uma divisão máxima de 1 ms.

### 2. Metodologia

Para construir o *hardware* do protótipo precisaremos dos seguintes materiais:

- 1 Transdutor piezoelétrico;
- 1 Capacitor cerâmico de 10 nF;
- 1 Resistor de 20 k $\Omega$  e 0,25 W;
- Conector p2 de quatro vias;
- Fios paralelos de fones de ouvido ou similares (pelo menos 20 cm).

Além dos materiais listados acima, precisaremos de ferro de solda e fluxo de solda para soldar os componentes, além de fita isolante para proteger o circuito. Vale ressaltar que o custo dessa lista é extremamente baixo, e pode ser praticamente nulo, uma vez que todos os componentes são de fácil obtenção em sucatas. O transdutor pode ser encontrado facilmente em brinquedos que emitem sons, como alguns tipos de jogos portáteis (minigames). O capacitor e o resistor são comuns em placas de circuito diversos tais como, fontes, placas de rádios, TV's, entre outros. O conector p2 pode ser reaproveitado de um fone de ouvido, por exemplo, ou de um cabo de microfone.

A montagem do sensor que transformará as ondas sonoras em sinais elétricos consiste em duas etapas: soldar os fios no que será nosso receptor e depois no conector p2. Para o receptor, basta soldar o capacitor em série com o polo positivo do transdutor e a seguir soldar o resistor em uma ligação em pa-

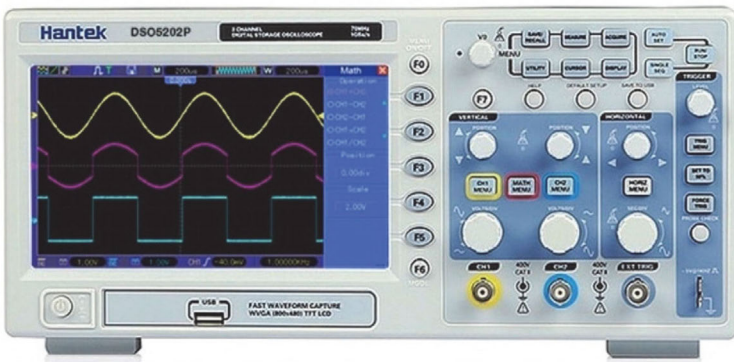


Figura 3 - Osciloscópio digital de bancada. O equipamento mostra três sinais elétricos simultaneamente na tela à esquerda; à direita estão os controles para ajustes. Fonte: [https://http2.mlstatic.com/osciloscopio-digital-bancada-dso5202p-hantek-200-mhz-D\\_NQ\\_NP\\_752757-MLB31082464626\\_062019-F.jpg](https://http2.mlstatic.com/osciloscopio-digital-bancada-dso5202p-hantek-200-mhz-D_NQ_NP_752757-MLB31082464626_062019-F.jpg)

ralelo entre os fios positivo e negativo. O esquema do circuito é mostrado na Fig. 4.

O projeto também funciona com os fios soldados diretamente ao transdutor, entretanto, devido a sua sensibilidade, percebemos um ruído muito grande no sinal recebido, de forma que o simples manuseio do equipamento torna-se uma fonte de erro no momento da obtenção das medidas. Ao acrescentar o resistor e o capacitor, obtivemos um sinal com melhor qualidade e menos ruídos, possibilitando melhor visualização dos sinais elétricos.

Já a outra extremidade dos fios deve ser soldada ao conector p2 de quatro vias. É imprescindível que o conector

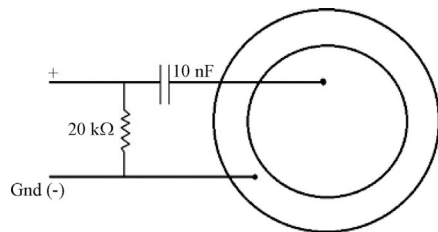


Figura 4 - Ligação dos componentes ao transdutor piezoelétrico.

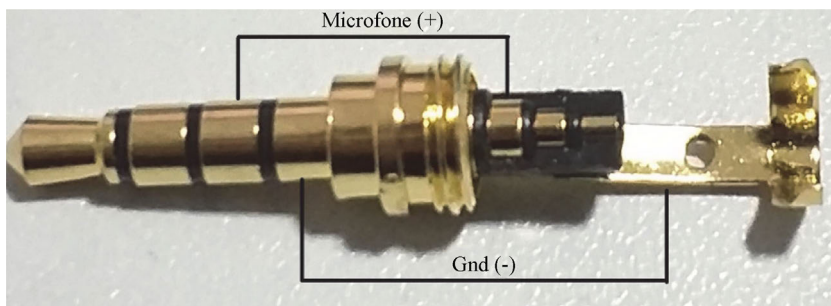


Figura 5 - Conector p2 de quatro vias. O primeiro segmento a partir da base corresponde ao negativo, enquanto o segundo corresponde ao positivo do sinal do microfone.

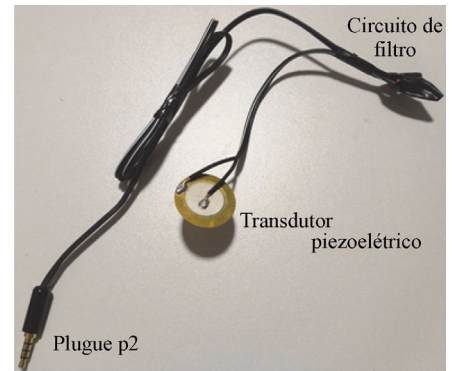


Figura 6 - Sensor completo montado pronto para uso.

possua quatro vias, pois somente esse tipo de conector permite a conexão de um microfone externo. O fio positivo que vem do detector, mostrado na Fig. 4, deve ser soldado ao contato destinado ao microfone, enquanto o fio negativo deve ser soldado ao contato referente ao Gnd (Negativo) do conector p2. Destacamos os contatos do conector na Fig. 5.

Em geral, essa distribuição de contatos mostrada na Fig. 5 é padrão, entretanto recomenda-se que se faça o teste para se certificar que realmente esses são os contatos correspondentes aos segmentos. Após soldados os fios, colocamos o encapsulamento no conector e o sensor está montado, o sensor completo é mostrado na Fig. 6.

Um teste para saber se a montagem foi feita corretamente pode ser feito ligando o conector diretamente na entrada de um computador deve reconhecê-lo como um dispositivo de entrada de áudio externa. Isso encerra a etapa de hardware utilizada no projeto.

Assim como em outros trabalhos [9], a utilização do *smartphone* mostrou-se muito útil, devido ao fácil acesso ao dispositivo. O programa utilizado para

simular o osciloscópio é o App Oscilloscope, que pode ser encontrado gratuitamente nas lojas de aplicativos. Originalmente, esse aplicativo foi desenvolvido para realizar leituras de sons do microfone do próprio aparelho celular e transformar essas ondas sonoras em sinais elétricos, mostrados no aplicativo. Entretanto, ao conectar nosso sensor ao celular, o sistema passa a captar os sinais elétricos gerados pelo transdutor piezoelétrico, uma vez que o celular reconhecerá que está conectado a uma entrada de áudio externa.

### 3. Resultados e discussões

Para testar o sensor, utilizamos uma sala completamente fechada, de forma que os ruídos do ambiente pudessem ser desconsiderados, e como fonte sonora utilizamos um violão. Deve-se ressaltar que é interessante utilizar como fonte sonora um equipamento que seja capaz de emitir um som com frequência aproximadamente constante. Com o violão colocado sobre uma mesa, fixamos o transdutor piezoelétrico à madeira do tampo e percutimos cada uma das cordas, para obtenção das frequências de ressonância pelo osciloscópio.

Cabe acrescentar uma observação sobre a frequência de oscilação do primeiro harmônico do violão. Embora os fabricantes de instrumentos indiquem os valores de frequência padrão das cordas, foi observado em laboratório [10] que algumas características físicas das cordas, como sua densidade, por exemplo, podem causar variações nos valores de frequência do primeiro harmônico. Um cálculo detalhado [10] mostrou que os enrolamentos adicionais de níquel, que são incorporados nas cordas mais grossas, podem causar pequenas variações de frequência de oscilação. Além desse fato, considera-

mos que o sinal que conseguimos detectar com o transdutor piezoelétrico representa uma frequência dominante demonstrada na corda, resultados mais precisos podem ser obtidos utilizando um estroboscópio, no caso de esse recurso estar disponível no laboratório.

Para cada corda, gravamos uma imagem em tempo real para determinação das frequências. A Fig. 7 apresenta o sinal obtido ao se percutir a segunda corda do violão (Si).

Diferentemente de um osciloscópio real, nosso *software* nos permite apenas quatro opções diferentes de resolução do sinal, a seleção é feita selecionando-se as opções (1, 2, 4 ou 8) mostradas no canto superior direito da Fig. 7. Como a frequência observada é relativamente baixa, a opção selecionada na medida que realizamos é a menor resolução de escala do aplicativo. Nessa opção, o sinal é dividido em 8 ms, representados pelas linhas verticais. Na parte inferior da Fig. 7 pode-se observar os valores das divisões, distribuídas a cada 8 ms. A melhor resolução de sinal que podemos obter nesse aplicativo é de 1 ms.

O eixo vertical não possui unidade de medida específica, funciona com uma escala de unidade arbitrária que é diretamente proporcional à intensidade do sinal. Entretanto, deslizando-se o dedo verticalmente sobre a área na qual é mostrada o sinal, pode-se aumentar ou diminuir a proporção da intensidade do sinal. Dessa forma, se o si-

nal recebido for muito intenso, podemos deslizar o dedo para baixo para que a proporção fique dentro da tela e seja possível identificar os picos e os vales do sinal. De forma análoga, se o sinal tiver intensidade muito baixa, podemos deslizar o dedo verticalmente para cima para aumentar o zoom da proporção do sinal na tela. É um recurso muito versátil para ler sinais de diferentes amplitudes. Opcionalmente, pode-se utilizar um conector para duplicar a entrada p2 e fazer a leitura de dois sinais simultaneamente, mas não testamos esse recurso.

Durante o tempo em que a corda do violão oscilava, o gráfico era mostrado em tempo real. Para coletar uma imagem estática do sinal, utilizamos um recurso do próprio aplicativo que obtém uma captura do sinal em dado instante. Para acionar esse recurso, basta clicar sobre a área que mostra o sinal e então o sinal mostrado naquele instante é congelado. A palavra “hold” que aparece no canto superior esquerdo da Fig. 7 mostra que a tela com o sinal instantâneo foi capturada com sucesso.

Para realizar o cálculo da frequência a partir da imagem do osciloscópio, optamos por fazer uma medição direta, com régua, da distância entre os pontos de máximo do sinal. Para cada medida,

foi tomada a distância entre dois pontos de máximo consecutivos, feita em três seções diferentes da figura do sinal. Então, calculamos o valor médio da distância entre os máximos.

Em seguida, realizamos uma medição direta entre os intervalos de divisão horizontal, (de 8 ms) e, a partir de uma proporção comparativa, obtivemos o período ( $T$ ) do sinal elétrico, o que nos permitiu calcular sua frequência. O procedimento de medida foi repetido para todas as seis cordas, sendo que os valores de frequência de cada corda, calculados a partir das informações do osciloscópio, são

apresentados na Tabela 1.

Para comparar o valor da frequência do sinal elétrico calculado a partir do osciloscópio com a frequência sonora emitida pelas cordas, utilizamos um outro celular, com um aplicativo desenvolvido especificamente para afinação de instrumentos musicais. Esse aplicativo mostra o valor da frequência sonora captada pelo microfone do celular com precisão de décimos de hertz. A leitura de frequência obtida para a mesma corda (Si) é mostrada na Fig. 8.

Podemos fazer a leitura direta da frequência pelo aplicativo, que, no caso da corda Si, mostrada na Fig. 8, foi de 246,7 Hz. A Tabela 1 mostra, para todas as cordas, a comparação entre os valores de frequência dos sinais elétricos obtidos pelo osciloscópio e a frequência sonora obtida pelo aplicativo de afinação:

Analisando a Tabela 1, podemos perceber que a média dos desvios é de apenas 2,6 Hz e todas as medidas apresentaram uma variação percentual relativa menor que 2% em relação ao valor total, o que mostra que o sinal elétrico captado pelo osciloscópio apresenta uma boa correspondência com o valor da frequência sonora incidente no transdutor piezoelétrico.

No nosso caso específico, como usamos um violão, podemos utilizar a informação do osciloscópio para, por

**No nosso caso específico, como usamos um violão, podemos utilizar a informação do osciloscópio para, por exemplo, calcular a velocidade de propagação da onda na corda**



Figura 7 - Espectro de sinal lido pelo osciloscópio para a segunda corda (Si) do violão.

Tabela 1: Valores de frequência dos sinais elétricos obtidos pelo osciloscópio em comparação com valores de frequência sonora obtidos pelo aplicativo de afinação.

Cordas	1	2	3	4	5	6
Frequência osciloscópio (Hz)	332,2	242,0	193,0	144,8	111,1	81,3
Frequência afinador (Hz)	328,7	246,7	195,6	147,2	109,7	82,0
$\sigma$ (Hz)	3,5	4,7	2,6	2,4	1,4	0,7



Figura 8 - Leitura de frequência da corda si obtida diretamente por aplicativo próprio para afinação de instrumentos musicais.

exemplo, calcular a velocidade de propagação da onda na corda. Sabemos [11] que a frequência de oscilação de uma corda com as duas extremidades fixas é dada pela Eq. (1):

$$f_n = n \left( \frac{v}{2L} \right); \quad n = 1, 2, 3... \quad (1)$$

em que  $f_n$  são as frequências de ressonância (HZ),  $v$  representa a velocidade de propagação da onda na corda (m/s),  $L$  é o comprimento da corda (m), e  $n$  representa o número do harmônico. No caso do nosso experimento, percutimos as cordas com seu comprimento total, da forma como estão fixadas no violão. Portanto, como se trata do modo de vibração do primeiro harmônico, frequência fundamental ( $n = 1$ ), temos que a velocidade da propagação da onda em cada corda pode ser obtida diretamente através da Eq. (2):

$$v = 2Lf \quad (2)$$

Além dos aspectos matemáticos que podem ser úteis na determinação de grandezas relacionadas ao comportamento ondulatório, a utilização do osciloscópio também possibilita abordar um concei-



Figura 9 - Sinal elétrico referente à quarta corda do violão (Ré); a frequência do sinal calculada foi de 144,8 Hz.

to um pouco mais abstrato na compreensão das ondas sonoras, o timbre.

Ao percutirmos as cordas do violão é possível perceber no osciloscópio a diferença de amplitude quando puxamos mais ou menos a corda em relação à sua posição original; o aumento da amplitude de oscilação da corda é acompanhado de um aumento na amplitude do sinal elétrico lido no osciloscópio. A periodicidade do sinal é facilmente percebida graficamente e podemos calcular de forma simples sua frequência como fizemos anteriormente. Entretanto, ao se compararem os sinais elétricos gerados por cordas diferentes, percebe-se que o formato da onda é ligeiramente diferente; um formato distinto de cada sinal nos fornece também a informação de um timbre diferente. A Fig. 9 apresenta o exemplo do sinal elétrico, gerado pelo transdutor, ao se percutir outra corda do violão.

Conforme podemos observar na Fig. 9, em comparação com a Fig. 7, a distinção entre os timbres das cordas pode ser percebida na conversão que o transdutor piezoelétrico faz para o sinal elétrico que é lido no osciloscópio. O formato do sinal indica que cada onda sonora que o originou possui características ligeiramente diferentes, essas diferenças que chamamos de timbre são o que nos faz reconhecer a diferença entre o som emitido por um piano ou por um violino, por exemplo, mesmo que tenham a mesma frequência e intensidade

**Variações sonoras que chamamos de timbre são o que nos faz reconhecer a diferença entre o som emitido por um piano ou por um violino, por exemplo, mesmo que tenham a mesma frequência e intensidade**

fonte emissora.

Embora a utilização do transdutor piezoelétrico seja ideal para converter ondas sonoras em sinais elétricos, o aparato também pode ser utilizado normalmente como um osciloscópio. Ao retirar os fios do transdutor piezoelétrico e soldar ponteiras nas extremidades dos fios, podemos utilizá-los como ponta de prova para analisar diretamente sinais elétricos em circuitos. A Fig. 10 apresenta um teste realizado com o protótipo. Nesse teste, uma placa de Arduino foi utilizada para gerar um sinal elétrico digital com frequência de 145 Hz (frequência próxima à obtida, por exemplo, na quarta corda do violão).

O que possibilita esse tipo de aplicação é o circuito de ‘filtro’ composto de capacitor e resistor. Isso torna o equipamento compatível com a tensão das portas do Arduino (5,0 V), portanto podemos conectá-lo sem problemas diretamente às portas de saída do Arduino e à entrada de áudio do smartphone ou tablet. Vale ressaltar que não é aconselhável utilizar esse aparato para ler sinais elétricos com tensões superiores a 5,0 V, para tais aplicações, o circuito de filtro teria que ser redimensionado.

O sinal gerado pela saída do Arduino é de natureza discreta, tendo como característica de sinal uma onda quadrada, uma vez que é gerada a partir de um sinal PWM (*Pulse With Modulation*), entretanto, na Fig. 10 observam-se algumas deformações nas partes superiores e inferiores do sinal. Essas deformações são causadas pela ação do capacitor ligado em série em nosso fil-

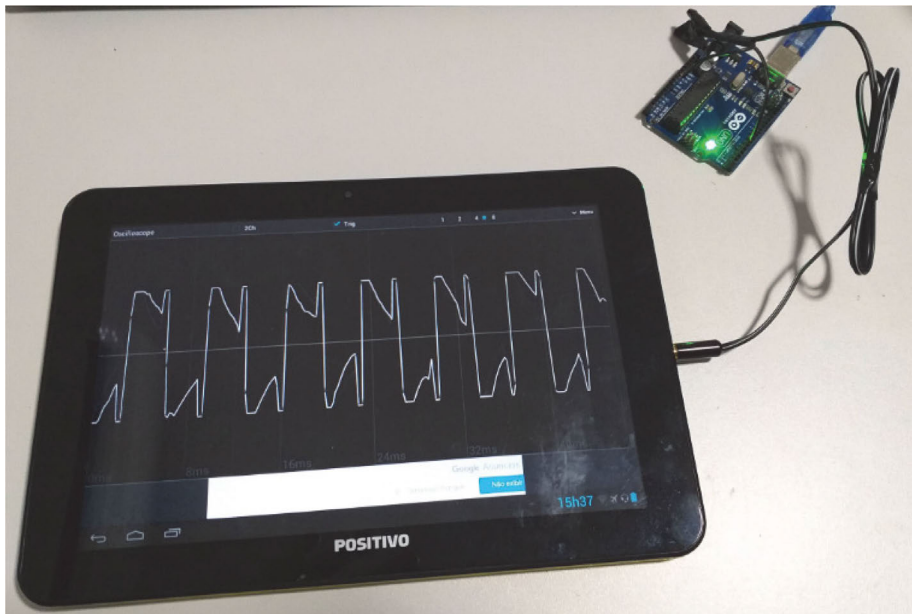


Figura 10 - Um tablet utilizando o aplicativo *Oscilloscope* mostrando um sinal elétrico gerado por uma placa Arduino (em cima e à direita). Os fios, antes soldados no transdutor, foram ligados diretamente às portas do Arduino.

tro, que, para um sinal dessa natureza, causa essa interferência.

#### 4. Considerações finais

Em linhas gerais, podemos avaliar

que o dispositivo de baixo custo, proposto para simular o funcionamento de um osciloscópio, apresentou bons resultados práticos. Os testes mostraram que as ondas sonoras, convertidas em sinais

elétricos pelo transdutor piezoelétrico, apresentaram coerência com os valores esperados o que reforça a funcionalidade do protótipo.

Os testes do protótipo para aquisição direta de sinais elétricos, por meio da placa Arduino, mostraram também bons resultados, na medida em que o osciloscópio foi capaz de apresentar corretamente a figura do sinal elétrico. Deve-se, entretanto, reafirmar os limites de segurança do protótipo, cujo dimensionamento permite trabalhar com voltagens não superiores a 5,0 V.

Em um cenário de eventual falta de espaço físico para laboratório ou, quando não é esse o caso, ausência de equipamentos específicos de laboratório de física, acreditamos que a utilização desse equipamento como estratégia de ensino pode oferecer uma grande gama de possibilidades para atividades didáticas. Cabe ressaltar que o equipamento não substitui completamente um osciloscópio de bancada ideal, mas acreditamos que ele possui diversas funcionalidades que possibilitam um bom potencial didático, especialmente a nível médio.

#### Referências

- [1] J.C.X. Silva, C.E.S. Leal, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, **39**, 1401 (2017).
- [2] M.L.B. Moreira, *Experimentos de Baixo Custo Para o Ensino de Mecânica Para o Ensino Médio*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2015.
- [3] H. Cordova, A.C. Tort, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, **38**, 2308 (2016).
- [4] S. Silveira, M. Girardi, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, **39**, 4502 (2017).
- [5] J.E.A. de Jesus Júnior, *Implementação de um Osciloscópio de Baixo Custo com Exibição Gráfica em Aplicativo para Android*. Monografia, Universidade de Engenharia de São Carlos, 2016.
- [6] B.M. Shou, *Osciloscópio Digital Portátil de Baixo Custo*. Monografia, Universidade Federal do Paraná, (2011).
- [7] S.M. Rezende, *Materiais e Dispositivos Eletrônicos* (Livraria da Física, São Paulo, 2015), 4ª ed.
- [8] M.F. Alves, *ABC do Osciloscópio* (Instituto Politécnico do Porto, Porto, 1998), 2ª ed.
- [9] G.F. Marranghello, J.V. Falcão, T.L.B. Aveiro, W.M. Lucas, *Revista Física na Escola*, **18**(1), 9 (2020).
- [10] F. Catelli, G.A. Mussato, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, **36**, 2304 (2014)
- [11] D. Halliday, R. Resnick, *Fundamentos de Física: Gravitação, Ondas e Termodinâmica* (LTC, São Paulo, 2018), 10ª ed.