

DESENVOLVIMENTO DE UM MEDIDOR DE PEQUENOS SINAIS ELÉTRICOS

Thiago Leonardo Maria¹, Esdras Garcia Alves²

¹Bolsista (FAPEMIG), Curso de Engenharia Mecânica, IFMG - campus Congonhas, Congonhas – MG; tlmaria97@gmail.com

²Orientador, Pesquisador do IFMG, IFMG - campus Congonhas, Congonhas – MG; esdras.alves@ifmg.edu.br

RESUMO

A experimentação é um aspecto importante do ensino de física. Em particular, nas aulas das disciplinas de física experimental, nos cursos de Licenciatura em Física, ela cumpre um papel fundamental na formação do futuro professor, tanto com respeito à construção de conceitos, quanto no desenvolvimento de competências relacionadas à manipulação e utilização de equipamentos. Contudo, tem se tornado difícil a aquisição de equipamentos para a implementação de novas práticas nestas disciplinas devido aos constantes cortes de verbas nos orçamentos das instituições de ensino e do alto custo dos equipamentos comercializados pelas empresas que fabricam equipamentos didáticos. No sentido de buscar soluções para essas dificuldades a comunidade acadêmica envolvida com o Ensino de Física tem procurado desenvolver experimentos com materiais de baixo custo que possam ser construídos por professores e estudantes. Alinhado com essa perspectiva da comunidade, foi proposto, pelos autores deste trabalho, um projeto de pesquisa voltado para o desenvolvimento de medidores de pequenos sinais elétricos utilizando componentes de custo reduzido. Especificamente, o projeto visa o desenvolvimento de um microvoltímetro e de um nanoamperímetro baseados no hardware Arduino e no conversor analógico digital HX711. Há diversos fenômenos na física, principalmente aqueles destinados a revelar aspectos da natureza e do comportamento da matéria em escala atômica, que requerem a medição de tensões elétricas da ordem de microvolts e correntes da ordem de nanoamperes para um estudo quantitativo. No entanto, medidores comerciais para essas faixas de tensões e correntes possuem um custo muito alto. Neste trabalho são apresentados o processo de desenvolvimento de um microvoltímetro, foco inicial do projeto, e os resultados parciais obtidos até o momento, pois o projeto ainda está em andamento. Os resultados mostram que o microvoltímetro, apesar de ter um custo muito menor que versões comerciais de um equipamento destinado a esse fim, apresenta boa correspondência com um multímetro comercial para faixas de tensão da ordem dos milivolts. Considerando a linearidade exibida pelos dados, pode-se afirmar que ele também é capaz de fornecer medidas com precisão aceitável para a faixa de microvolts.

INTRODUÇÃO

Embora haja críticas sobre o modo como as atividades experimentais são conduzidas nas salas de aula (Araújo e Abib, 2003; Borges, 2002), pode-se dizer que há certo consenso entre professores, estudantes e pesquisadores, acerca da sua relevância no ensino da física. Segundo Pereira e Moreira (2017), a tradição do uso de atividades experimentais no ensino está relacionada aos grandes projetos de renovação curricular da década de 1960, sendo, portanto, uma temática que há muito interessa à área de pesquisa em Ensino de Física. Mais recentemente, é possível observar um aumento do interesse em pesquisas que propõem uma participação mais ativa do estudante nas atividades experimentais, em que ele se coloque mais como protagonista de seu aprendizado, em vez de apenas seguir um roteiro do tipo “receita” (Borges, 2002; Wesendonk e Prado, 2015; Guimarães et al., 2018; Odashima, 2018).

As aulas das disciplinas de física experimental nos cursos de graduação oferecem essa oportunidade aos estudantes, pois eles devem manipular os experimentos, executar as medições e refletir sobre os resultados encontrados, para alcançar os objetivos e chegar às conclusões esperadas ao realizar a atividade experimental. Em particular, nos cursos de Licenciatura em Física, as disciplinas de física experimental têm um papel ainda mais importante na formação do futuro professor, pois por meio delas o estudante tem a oportunidade de vivenciar, e refletir sobre, diversos fenômenos fundamentais que são/foram objetos de estudo da Física e serão objetos de ensino em sua futura prática.

Alguns destes fenômenos, principalmente aqueles relacionados à estrutura e constituição da matéria, demandam a utilização de equipamentos capazes de medir pequenos sinais elétricos (tensões e correntes) como o efeito Hall, o efeito fotoelétrico, o efeito Thomson, dentre outros. No efeito fotoelétrico, por exemplo,

as correntes elétricas envolvidas no estudo do fenômeno se situam na faixa dos nanoampères (10^{-9} A) ou mesmo dos picoampères (10^{-12} A). Em medidas envolvendo o efeito Hall em metais as tensões elétricas se situam na faixa dos microvolts (10^{-6} V). No entanto, os multímetros comerciais comumente encontrados no mercado não possuem faixas adequadas à medição de sinais elétricos de valores tão pequenos. Em geral, quando muito, esses multímetros apresentam faixas de microampères (10^{-6} A) para a medição de correntes e de milivolts (10^{-3} V) para a medição de tensões.

Para a realização de medidas de grandezas elétricas com valores tão pequenos é necessária a utilização de equipamentos especificamente projetados para este fim, cujo custo costuma ser alto. Enquanto um multímetro comum pode ser adquirido por cerca de R\$ 300,00, um microvoltímetro ou nanoamperímetro não é encontrado por menos de R\$ 1000,00¹ (é importante ressaltar que neste valor não estão incluídos os custos com importação e frete, uma vez que essa ideia de custo foi obtida a partir de páginas de empresas que comercializam esses equipamentos em sites do exterior; portanto, o custo total de um aparelho com essas características seria ainda maior que o valor do produto exibido no site). Considerando a escassez de recursos que as instituições federais têm enfrentado com o constante e duradouro corte de verbas, a inserção de novas práticas no laboratório de física experimental, que demandam investimentos em equipamentos específicos, tem se tornado impraticável devido à impossibilidade de equacionar os fatores falta de recursos e equipamentos de alto custo.

No sentido de contornar essas dificuldades a comunidade envolvida com o ensino de física tem buscado elaborar materiais experimentais alternativos que possam ser usados por professores e estudantes em aulas práticas. No Brasil, em periódicos como a Revista Brasileira de Ensino de Física e o Caderno Brasileiro de Ensino de Física, são encontrados trabalhos com diversas propostas experimentais utilizando materiais de custo reduzido. Procurando um alinhamento com esta perspectiva da comunidade acadêmica e visando contribuir com propostas úteis a outros professores e estudantes foi criado pelos autores deste trabalho um projeto de pesquisa que tem por objetivo o desenvolvimento de um microvoltímetro e de um nanoamperímetro de custo reduzido. Tais equipamentos são destinados à utilização futura em experimentos didáticos de física.

A escolha pelo desenvolvimento desses dois medidores específicos – microvoltímetro e nanoamperímetro – está diretamente relacionada com a dificuldade enfrentada por um dos autores em equipar o laboratório de física do campus onde atua. Esta dificuldade é maior com relação aos experimentos voltados para a investigação da estrutura e da constituição da matéria, cujo custo, nas empresas de produção de material para laboratório, costuma ser muito alto. O custo desses experimentos é geralmente mais alto pois além da montagem em si, necessária para se realizar a investigação do fenômeno, são necessários medidores específicos. Considerando que o medidor de pequenos sinais elétricos é fundamental para a realização de diversos tipos de experimentos voltados para a investigação de fenômenos físicos como o efeito Hall, o efeito Seebeck e o efeito fotoelétrico, foi elaborado um projeto que visa desenvolver esses medidores utilizando componentes de custo reduzido.

Para o desenvolvimento dos medidores foi escolhido o Arduino, um hardware cujo aspecto físico de duas de suas versões mais comuns pode ser visto na Figura 1. O Arduino é uma pequena placa de circuito que contém os elementos básicos de um computador simples. Ele possui diversas portas de entrada de sinais digitais e analógicos, o que o torna muito útil em experimentos didáticos. Seu custo é baixo, considerando os recursos e as potencialidades que oferece, e pode ser conectado diretamente à porta USB do computador. Soma-se a isso o fato de que o software usado em sua programação é distribuído gratuitamente na WEB e há uma comunidade ampla e diversa na internet envolvida com o desenvolvimento de aplicações e soluções utilizando o Arduino. Todas essas vantagens contribuíram para que diversos pesquisadores percebessem o grande potencial desse dispositivo e passassem a utilizá-lo no desenvolvimento de seus experimentos (para alguns exemplos, ver Souza et al., 2011; Cavalcante et al., 2011; Cavalcante et al., 2014; Pereira et al., 2015; Neto et al., 2017; Oliveira et al., 2020; Silva et al., 2021).

Além do Arduino, também foi utilizado o conversor analógico digital HX711. Esse conversor é necessário para tornar possível a leitura de pequenos sinais elétricos. Na próxima seção serão detalhados os aspectos do desenvolvimento do microvoltímetro utilizando esses dois componentes.

¹ <https://www.indiamart.com/proddetail/digital-micro-voltmeter-13305105062.html>
<https://www.ebay.co.uk/itm/124728300328?var=0&mkevt=1&mkcid=1&mkrid=710-53481-19255-0&toolid=10050&campid=5338358731&customid=16213688246924146837712021000008005>
<https://edulab.com/product/micro-voltmeter>. Sites acessados em abril de 2022.

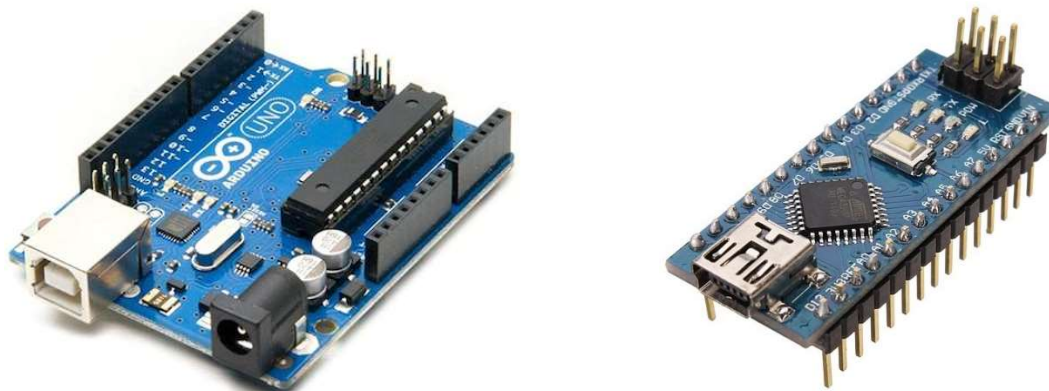


Figura 1 – Aspecto físico das placas Arduino UNO (à esquerda) e Arduino Nano (à direita).

METODOLOGIA

O Arduino é um dispositivo capaz de ler tensões elétricas em suas portas. Contudo, não obstante suas potencialidades, que o tornam extremamente interessante para ser usado em experimentos didáticos de física, há uma limitação quanto à leitura de sinais elétricos de baixa intensidade. O conversor analógico digital (AD) do Arduino, de 10 bits, permite uma resolução máxima de aproximadamente 4,9 mV ($4,9 \times 10^{-3}$ V), se tomarmos como referência sua alimentação de 5 V. Isso significa que ele não é capaz de medir tensões menores que esse valor de modo satisfatório.

A resolução R de um conversor AD é dada pelo seu número de bits n e pela tensão V_{ref} usada como referência em sua alimentação. Estas grandezas se relacionam conforme a equação (1).

$$R = V_{ref} \left[\frac{1}{(2^n - 1)} \right] \quad (1)$$

Considerando uma tensão de referência de 5 V pode-se verificar, pelo emprego da equação (1), que um conversor de 24 bits terá uma resolução de aproximadamente 0,3 μ V. Essa resolução é suficiente para medir as tensões nas faixas mencionadas anteriormente pois está abaixo de 1 μ V. Diante disso, o primeiro passo metodológico tomado para a realização do projeto foi a busca por um conversor AD de 24 bits.

Utilizando ferramentas de buscas na internet foram realizadas pesquisas em sites com o objetivo de encontrar um conversor analógico digital cuja resolução estivesse em torno de 24 bits. Foram encontrados 4 com a resolução necessária: ADS1256, HX711, ADS1263 e AD7177 (veja o aspecto físico destes componentes na Figura 2).

O ADS1256 é um conversor de 24 bits de resolução, possui oito canais de leitura de dados, usa a interface SPI, possui entradas diferencial e única. O custo deste dispositivo está na faixa dos R\$ 210,00. Por outro lado, o HX711, que também é um conversor de 24 bits, muito empregado na construção de balanças digitais, possui dois canais de leitura de dados, apresenta leitura diferencial e seu custo está em torno de R\$ 12,00.

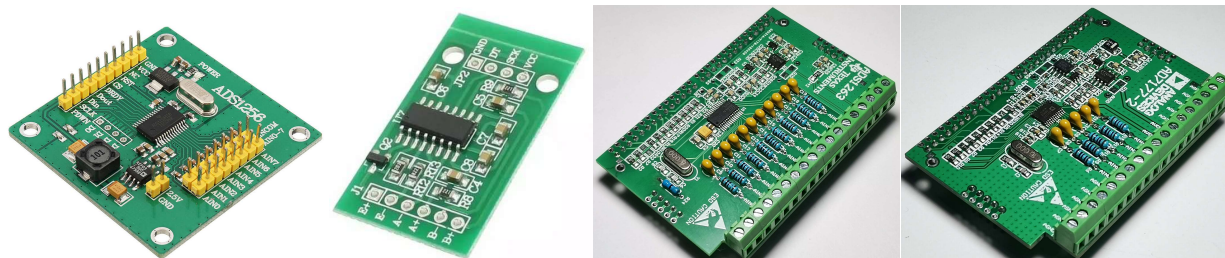


Figura 2 – Da esquerda para a direita, conversores ADS1256, HX711, ADS1263 e AD7177.

O ADS1263 é um conversor de 32 bits, possui 10 canais simples ou 5 diferenciais, tem uma taxa de amostragem de 38,4 ksp/s, comunicação com o controlador SPI e preço médio de R\$ 190,00. O AD7177 também é um conversor de 32 bits de resolução, taxa de amostragem de 5 a 10 ksp/s, possui 2 canais diferenciais ou 4 simples, porém seu preço médio está em torno de R\$ 500,00. Estes dois últimos componentes foram encontrados em sites de venda internacionais.

Os produtos de venda internacional possuem um tempo de entrega longo e um frete elevado, o que inviabiliza, de certa forma, sua aquisição e utilização. Considerando a questão do custo, que é uma das diretrizes do projeto, foi definido o conversor HX711 como o mais apropriado para o desenvolvimento dos medidores.

Uma vez selecionado o conversor, o passo seguinte foi o desenvolvimento de uma fonte que pudesse produzir tensões na faixa dos microvolts e correntes na faixa dos nanoamperes. Para o desenvolvimento da fonte foi utilizado um circuito resistivo divisor de tensão, composto por 9 resistores de 15 M Ω , uma chave rotativa de 1 polo por 9 posições, um potenciômetro de 100 k Ω e uma pilha de 1,5 V. A Figura 3 mostra, à esquerda, uma fotografia do circuito montado em uma base de MDF, e à direita, seu diagrama esquemático.

A pilha fornece uma tensão fixa e bastante estável para o divisor resistivo. Ao girar a chave rotativa a resistência de um dos ramos do divisor é alterada, modificando a tensão de saída do circuito. Para reduzir ainda mais a tensão de saída pode ser usado o potenciômetro, que altera o outro ramo do divisor. Na saída do circuito pode ser ligado um voltímetro para medir a tensão de saída e no ramo indicado no diagrama da Figura 3 pode ser conectado um amperímetro para medir a corrente.

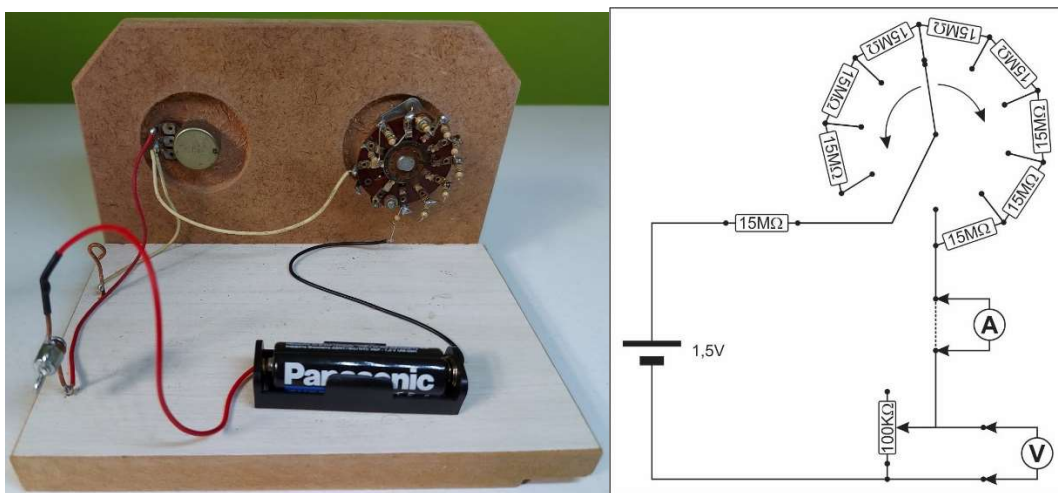


Figura 3 – Circuito para a geração de baixas correntes e tensões.

O passo seguinte foi a montagem do microvoltímetro, em que foram empregados um conversor AD HX711 e um Arduino Nano. Devido aos problemas encontrados na primeira etapa de testes, conforme será relatado na próxima seção, foi necessário utilizar o Arduino desconectado do computador. Sem a conexão com o computador foi preciso empregar um *display* para a exibição dos valores e uma fonte de alimentação. Foi utilizado um *display* gráfico OLED 0,96", de 128x64 pixels, e uma fonte formada por uma bateria de lítio de 3,7 V ligada a um conversor de tensão DC-DC MT3608, que eleva a tensão da bateria para 9 V. A Figura 4 mostra uma fotografia do circuito do microvoltímetro montado em uma *protoboard* (à esquerda) e um diagrama icônico com as ligações (à direita).

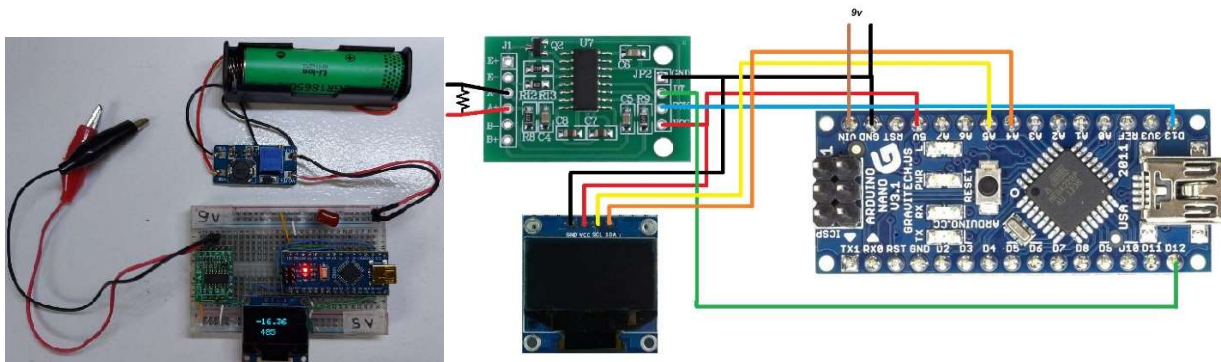


Figura 4 – Fotografia do circuito e diagrama elétrico do microvoltímetro.

A leitura dos sinais elétricos com esse circuito requer um código que deve ser carregado na memória do Arduino. Como há uma grande comunidade de desenvolvedores de soluções baseadas no Arduino, que compartilham suas informações gratuitamente na internet, não foi difícil encontrar um código que pudesse ser adaptado às necessidades do projeto. O código utilizado foi originalmente desenvolvido por programadores

para gerar os dados brutos da leitura do HX711, cuja saída é composta por números inteiros que variam de 0 a 16.777.215, conforme o valor da tensão aplicada à sua entrada.

A adaptação no código consistiu em implementar uma equação de conversão capaz de transformar esse dado bruto em um valor de tensão correspondente em μV . O procedimento para determinar essa equação de conversão envolveu a utilização de um multímetro comum para realizar as mesmas leituras que o HX711. Para cada posição da chave rotativa há um valor de tensão na saída do circuito da fonte. O valor dessa tensão foi lido, alternadamente, pelo multímetro e pelo circuito com o HX711. Desta forma, foram obtidos pares de números compostos por uma leitura em mV e o correspondente valor bruto de saída do HX711. Com esses pares de valores foi elaborado um gráfico e determinadas as constantes da equação da curva com o auxílio do software Excel. Algumas linhas do código foram então modificadas para a exibição do valor da tensão em microvolts no *display*. Por motivos de espaço o programa não será reproduzido aqui; ele poderá ser encontrado nos relatórios do projeto de pesquisa).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

De posse dos circuitos da fonte e do medidor foram realizados os primeiros testes para verificar sua funcionalidade. Nestes testes foram verificados alguns problemas, a saber: as leituras não apresentavam estabilidade; ao conectar o HX711 ao circuito da fonte juntamente com o multímetro (para comparar as leituras) foi observada uma queda de tensão; a curva de calibração não era linear como previsto inicialmente.

A questão da instabilidade das leituras estava relacionada à conexão do Arduino com o computador. Um cabo USB é usado para ligar o Arduino ao computador e serve tanto para sua alimentação elétrica quanto para a troca de dados entre eles. As leituras realizadas pelo Arduino são enviadas pelo cabo USB e exibidas na tela do computador em uma ferramenta denominada Monitor serial. Foi notado que diversas ações produziam interferências nas leituras, como ligar o *notebook* na rede de energia elétrica, conectar um cabo HDMI para o uso de um monitor extra, ou mesmo ligar outros dispositivos eletrônicos a outras portas USB do *notebook*. Diante de todas essas situações de interferência optou-se por eliminar a conexão do Arduino com o computador. O resultado foi a obtenção de medidas estáveis, porém, foi necessário usar um display para a exibição das leituras, pois não havia mais a tela do computador. Também foi preciso usar uma fonte de energia externa para o funcionamento do circuito, pois não havia mais a alimentação pela USB do computador.

A queda de tensão é um problema para o qual ainda não foi encontrada a causa específica. Essa queda de tensão é percebida sempre que dois aparelhos são ligados ao circuito da fonte. Se apenas o multímetro, ou o HX711, for ligado à fonte, o valor de tensão lido é maior que se os dois equipamentos forem conectados juntamente. Supondo que a alteração fosse causada pelo circuito do HX711, foi experimentado ligar dois multímetros ao circuito da fonte e novamente uma queda de tensão foi observada. É possível que o circuito da fonte não seja capaz de fornecer a corrente necessária ao funcionamento dos dois dispositivos ao mesmo tempo (embora alta, a impedância de um voltímetro não é infinita). Pelo fato de ainda não haver uma compreensão da causa do problema foi adotada como estratégia a utilização dos medidores de forma alternada no momento da realização das medidas, ligando um aparelho de cada vez no momento da medição.

Por fim, quanto à não linearidade da curva, foi observado que as leituras divergiam em maior medida para os valores mais altos da tensão de saída (a partir dos 8 mV). Sendo a tensão de saída maior, há menos resistores na cadeia do circuito divisor e uma maior corrente circula por ele. Provavelmente, essa maior corrente parece influenciar a medição da tensão. Considerando que o HX711 é um conversor AD muito utilizado em balanças com sensores do tipo extensômetros, cuja resistência elétrica varia quando são submetidos a tensões mecânicas, foi experimentado colocar um resistor em paralelo com a entrada de tensão do conversor. Com essa estratégia as leituras melhoraram consideravelmente. Experimentando alguns valores empiricamente chegou-se a um bom resultado utilizando um resistor de 470 k Ω . Esse é outro ponto que ainda carece de melhor compreensão.

Com todos esses aprimoramentos para corrigir os problemas encontrados foi possível realizar as leituras para gerar a curva e obter a equação de conversão. A Figura 5 mostra o gráfico em que se pode ver a correspondência entre a tensão de saída da fonte lida pelo HX711 e exibida como um dado bruto (eixo X), e o valor da mesma tensão lida pelo multímetro em mV (eixo Y).

Por meio de uma regressão linear foi obtida a equação de conversão (veja o gráfico da Figura 5). Essa equação foi inserida no código do Arduino juntamente com outras linhas para que o *display* apresentasse as leituras dos valores de tensão em μV . Em seguida, foi realizado um novo conjunto de leituras da tensão da

fonte, iniciando com uma tensão de 7,9 mV e reduzindo esse valor para além da capacidade de leitura do multímetro. Os resultados encontrados podem ser vistos na Tabela 1.

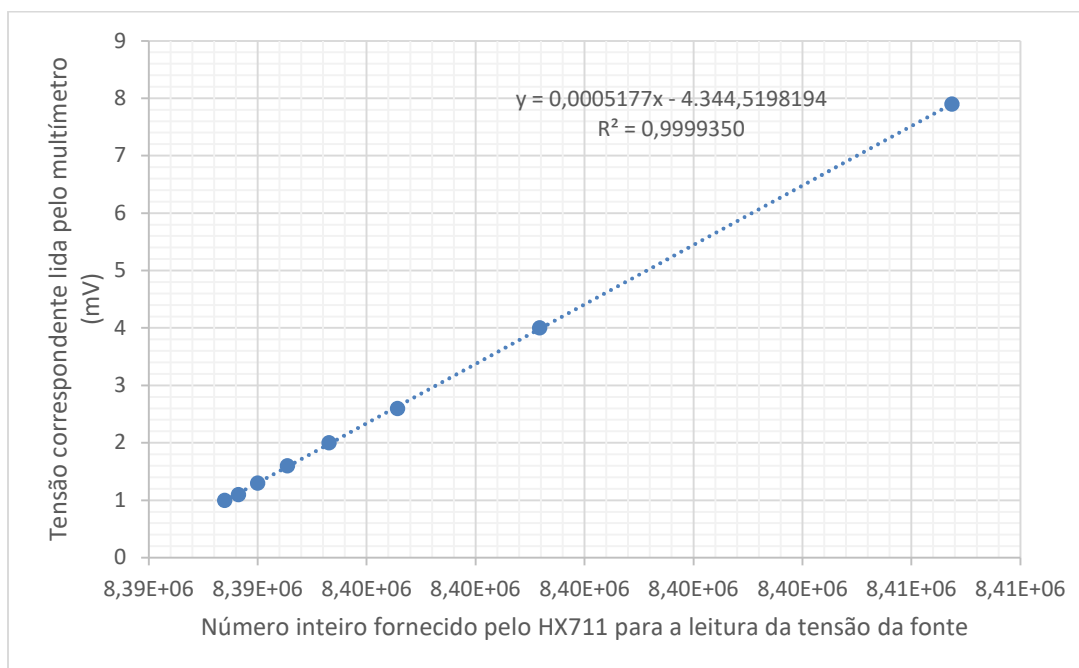


Figura 5 – Curva de calibração do microvoltímetro.

Tabela 1 – Comparação entre os valores da tensão de saída da fonte lidas pelo multímetro e pelo HX711.

Valor lido pelo multímetro (mV)	Valor lido pelo HX711 e convertido com base na equação do gráfico da Figura 5 (μV)
7,9	7.904
4,0	3.991
2,6	2.642
2,0	1.993
1,6	1.598
1,3	1.315
1,1	1.135
1,0	1.003
0,8	882
0,5	523
0,1	175
0,0	50
0,0	10
0,0	1

Portanto, pelos dados da Tabela 1 é possível verificar que os valores lidos pelo multímetro comercial correspondem com os valores lidos pelo HX711 nas tensões mais altas (note que as escalas são diferentes, mas os valores são praticamente os mesmos; por exemplo, 7,9 mV é muito próximo de 7.904 μV). Deste modo, pode-se concluir que o circuito desenvolvido está se mostrando bastante adequado ao que se esperava como objetivo do trabalho. Também, a partir da tabela, é possível notar que a resolução do medidor chega à faixa da unidade na escala dos microvolts. Note como o multímetro não é capaz de ler as tensões abaixo de 0,1 mV, mas o microvoltímetro construído sim.

Foi observada uma pequena flutuação nas leituras do HX711, que não fogem ao esperado, mas que se acredita poder diminuir com a montagem do medidor em uma placa de circuito impresso e a colocação de todo o circuito em uma caixa metálica. Essas duas ações poderiam eliminar outras possíveis fontes de interferência.

CONCLUSÕES

Neste trabalho foi feito um relato sobre o desenvolvimento de um projeto de pesquisa do IFMG que visa o desenvolvimento de um microvoltímetro e de um nanoamperímetro, de baixo custo, baseados no Arduino, que possam ser utilizados em atividades experimentais de física. Diante de um cenário de escassez de recursos justifica-se o desenvolvimento de experimentos de custo reduzido no sentido de auxiliar as instituições de ensino a terem condições de equipar seus laboratórios com equipamentos que atendam às necessidades didáticas.

Foram apresentados os resultados parciais do projeto, cujo foco, neste primeiro momento, esteve sobre o desenvolvimento do microvoltímetro. Os problemas identificados em uma primeira etapa de testes foram parcialmente resolvidos e os resultados das medidas se mostraram satisfatórios para uma atividade didática. Conforme se pode constatar pelos dados da Tabela 1 as medições realizadas pelo multímetro e pelo medidor construído concordam na escala dos milivolts (onde é possível medir com o multímetro comum). Desse modo, pode-se inferir, com base na linearidade dos dados do gráfico da Figura 5, que as medições abaixo dessa escala (na escala dos microvolts) também estão corretas.

Como próximas etapas serão realizadas medidas de tensão em experimentos de física cuja ordem de magnitude se situa na escala dos microvolts, como o efeito hall em metais e o efeito Thomson. A expectativa é que o medidor desenvolvido seja capaz de medir os valores de tensão nesses fenômenos, tarefa que os medidores comuns não foram capazes de realizar conforme testes realizados pelos pesquisadores deste trabalho.

Espera-se que na medida em que trabalhos como este sejam tornados públicos outros pesquisadores se atentem para a necessidade de se envolver com o desenvolvimento de equipamentos didáticos de custo reduzido para as áreas de ciências exatas e engenharias. Equipamentos destinados a estas áreas possuem alto custo para serem adquiridos em empresas do ramo de materiais para laboratório e as instituições têm enfrentado dificuldades com as constantes reduções em seus orçamentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BORGES, A. T. Novos rumos para o laboratório escolar de ciências. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 19, n. 3, 2002.
- CAVALCANTE, M.; TAVOLARO, C.; SANTOS, E. Física com Arduino para iniciantes. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 33, n. 4, 2011.
- CAVALCANTE, M.; RODRIGUES, T.; BUENO, D. Controle remoto: observando códigos com o Arduino. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 31, n. 3, 2014.
- GUIMARÃES, I.; CASTRO, D.; LIMA, V.; ANJOS, M. Ensino de ciências e experimentação: reconhecendo obstáculos e possibilidades das atividades investigativas em uma formação continuada. **Thema**, v. 15, n. 3, 2018.
- NETO, J.; APOLINÁRIO, F.; SOARES, A. Sistema photogate de seis canais analógicos para laboratórios didáticos de física. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 42, n. 1, 2017.
- ODASHIMA, M. Atividades investigativas de baixo custo no curso de licenciatura em física. **Anais do IX Encontro Mineiro Sobre Investigação na Escola**, Uberlândia, setembro de 2018.
- OLIVEIRA, I.; SILVA, W.; RAMOS, J. Melo, C.; TAKIYA, C.; CHAVES, V. Construção de uma maquete experimental automatizada para o estudo da polarização da luz e comprovação experimental da lei de Malus com o auxílio da plataforma Arduino. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 42, 2020.
- PEREIRA, A.; SANTOS, A.; AMORIM, H. Ensinando Física das radiações com um contador Geiger baseado em plataforma Arduino. **Atas do XXI Simpósio Nacional de Ensino de Física**, Uberlândia, janeiro de 2015.
- PEREIRA, M.; MOREIRA, M. Atividades prático-experimentais no ensino de Física. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 34, n. 1, 2017.
- SILVA, O.; SCHMIDT, L.; LABURÚ, C. Proposta de atividade experimental para estudos de frequências de um marcador de tempo usando o Arduino. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 38, n.1, 2021.
- SOUZA, A.; PAIXÃO, A.; UZÊDA, D.; DIAS, M.; DUARTE, S.; AMORIM, H. A placa Arduino: uma opção de baixo custo para experiências de física assistidas pelo PC. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 33, n. 1, 2011.
- WESENDONK, F.; PRADO, L. Atividades didática baseada em experimento: discutindo a implementação de uma proposta investigativa para o ensino de física. **Experiências em Ensino de Ciências**, v. 10, n. 1, 2015.