

UTILIZAÇÃO DO ARDUINO NO CÁLCULO EXPERIMENTAL DA GRAVIDADE: UM PROTÓTIPO ACESSÍVEL A DEFICIENTES VISUAIS

USE OF ARDUINO IN A EXPERIMENTAL DETERMINATION OF GRAVITY: A PROTOTYPE ACCESSIBLE TO THE VISUALLY IMPAIRED

Luan Lamon Machado¹, Julio César Madureira Silva², Edmundo Rodrigues Junior³, Tiago Destéffani Admiral⁴

*Instituto Federal do Espírito Santo¹-Campus Cachoeiro de Itapemirim- e-mail: lamon.engenharia@gmail.com;
Instituto Federal do Espírito Santo²-Campus Cachoeiro de Itapemirim- e-mail: jmadureira@ifes.edu.br; Instituto
Federal do Espírito Santo³- Campus Cachoeiro de Itapemirim- e-mail: edmundor@ifes.edu.br; Instituto Federal
Fluminense⁴- Campus Centro- Campos dos Goytacazes e-mail: tdesteffani@gmail.com*

Este artigo descreve um protótipo para aferir o valor da aceleração da gravidade acessível a alunos com deficiência visual. O dispositivo utiliza Arduino, grafias em braille e sensor acústico, o que possibilita aos alunos cegos realizarem de forma tátil e audível a medição do valor experimental da gravidade com razoável precisão, apresentando erros percentuais relativos da ordem de 1,5%. Todo o projeto é de fácil construção e os componentes utilizados são acessíveis e facilmente encontrados no mercado nacional. Os testes com o protótipo indicaram que, dada sua interface intuitiva e consistência nos resultados obtidos, ele pode ser uma boa opção para aulas práticas com alunos com e sem deficiência visual.

Palavras-Chave: Aceleração da Gravidade; Arduino; Deficiente Visual

This paper describes a prototype to assess the value of gravity acceleration accessible to the blind students. The device uses Arduino, Braille spellings and an acoustic sensor, which allows blind students to measure the experimental value of gravity in a tactile and audible way with reasonable precision, with relative percentage errors less than or equal to 1,5 %. The entire project is easy to build and the components used are accessible and easily found in the national Brazil market. It is hoped that this prototype can support the elaboration and application of didactic sequences.

Keywords: Gravity Acceleration; Arduino; Blind students

INTRODUÇÃO

A utilização de experimentos é um importante instrumento para a promoção do conhecimento científico [1], não limitando-se apenas para motivação do aluno, mas também atuando para facilitar a integração entre teoria, prática [2] e promoção da aprendizagem significativa [3]. É por meio da experimentação que situações potencialmente ricas aparecem, e soluções são criadas [4].

Dentre alguns benefícios que a experimentação proporciona aos alunos estão: contato direto com fenômenos abordados, aguçamento do saber ao se deparar com erros, imprevistos, desafios e interação entre os alunos [5].

Embora exista um consenso entre os professores de que a experimentação representa uma atividade fundamental no ensino de ciências, a realização de experimentos no cenário escolar ainda encontra muitos empecilhos [6].

Autores apontam alguns obstáculos que dificultam a utilização de experimentos de física na escola, tais como: a carência de pesquisas sobre o que os alunos realmente aprendem por meio dos experimentos [7]; despreparo do professor para trabalhar com atividades experimentais [8]; escassez de professores licenciados em física, cuja falta, muitas vezes, é suprida com professores de áreas afins [9]; más condições de trabalho e falta de laboratórios [10].

Existe um cenário ainda mais prejudicial para a consolidação do ensino de física com qualidade: trata-se da dificuldade de inserção participativa de alunos com necessidades especiais, inclusive deficientes visuais, no ambiente escolar [11], especialmente nas atividades práticas. Esses alunos apresentam dificuldades de aprendizado devido aos métodos de ensino tradicionais que priorizam estratégias que valorizam as percepções visuais, anotações de textos, técnicas de avaliação baseadas em provas escritas, em geral não adaptadas para alunos com deficiência visual [12].

Portanto é necessário melhorar a qualidade do ensino para que deficientes visuais consigam participar ativamente na sala de aula, uma vez que a legislação educacional vigente garante a mesma qualidade de educação para todos, sem exceção. Para isso é necessário adaptar os equipamentos tradicionais para que possam emitir sons e /ou que possam ser tocados e manipulados, com objetivo de motivar e estimular os alunos cegos a interpretar os fenômenos estudados no experimento [13].

A abordagem do tema aceleração da gravidade em objetos em queda livre usando Arduino são encontrados na literatura [14, 15, 16, 17]. No entanto, nenhum deles apresenta seus protótipos adaptados para alunos com deficiência visual.

Para a aferição da aceleração do módulo da aceleração da gravidade utilizamos um Arduino, acoplado a um emissor acústico, em associação a uma estrutura produzida com madeira tipo MDF, com grafias em braile.

DISCUSSÕES TEÓRICAS

Experimentos de física para deficientes visuais

Encontramos na literatura um artigo [18] sobre um experimento com circuito oscilador para tratar da lei de Faraday-Lenz a partir da implementação de um alto-falante ligado a um circuito eletrônico, no lugar do tradicional amperímetro, em consonância com um trabalho [19] que relata o panorama geral das dificuldades e viabilidades para inclusão de alunos com deficiência visual em aulas de magnetismo. Os autores utilizaram experimentos envolvendo circuitos elétricos e maquetes multissensoriais. Eles também desenvolveram um experimento inclusivo para o ensino de ótica [20].

No campo do ensino da astronomia podemos citar o exemplo de um trabalho [21] que promove oficinas, com a temática "Escalas do Sistema Solar" pautadas em uma didática multissensorial, isto é, maquetes táteis-visuais e desenhos em alto relevo. No mesmo sentido outro trabalho [22] relata a elaboração de um experimento tátil com PVC para analisar as fases da lua.

Sobre propagação sonora podemos mencionar um trabalho [23] que aborda experimentalmente o efeito Doppler para explicar a expansão do universo para alunos cegos. Para isso, foi construído uma mesa de ondas transversais, com um suporte para medição do comprimento de onda, a partir de régua em alto relevo.

Partindo para o estudo da mecânica, podemos citar um trabalho [24] que consistiu no desenvolvimento de diferentes aparatos para analisar conceitos da mecânica, tais como atrito e aceleração. Materiais com diferentes rugosidades são utilizados e formas geométricas contribuem para que o aluno possa identificar os componentes vetoriais das forças peso e atrito. Já outro artigo [25] apresenta

diferentes aparatos construídos e adaptados para uma turma inclusiva tais como: pêndulo simples e plano inclinado.

Por fim encontramos um artigo [26] que descrevia o desenvolvimento de dois experimentos, para alunos cegos, que abordam “o conceito gravitacional de ação à distância e sua influência para a aceleração de um objeto”. No primeiro foi utilizado um plano inclinado, enquanto no segundo, um disco metálico foi abandonado dentro de um tubo.

Em meio a constatação da existência de poucos experimentos disponíveis para alunos com deficiência visual, reforçamos a necessidade de elaborar mais materiais inclusivos para que os professores possam utilizá-los em sala de aula com o objetivo de tornar a aula mais dinâmica e participativa para tais alunos.

Experimentos de Física com Arduino

O Arduino é uma plataforma eletrônica de código aberto baseada em hardware e software fáceis de usar [27]. Basicamente o dispositivo lê dados de entrada, os manipula através de um conjunto de instruções, executadas pelo microcontrolador, que converte os dados em sinais de saída para controlar diversos dispositivos, desde simples sensores até grandes atuadores industriais.

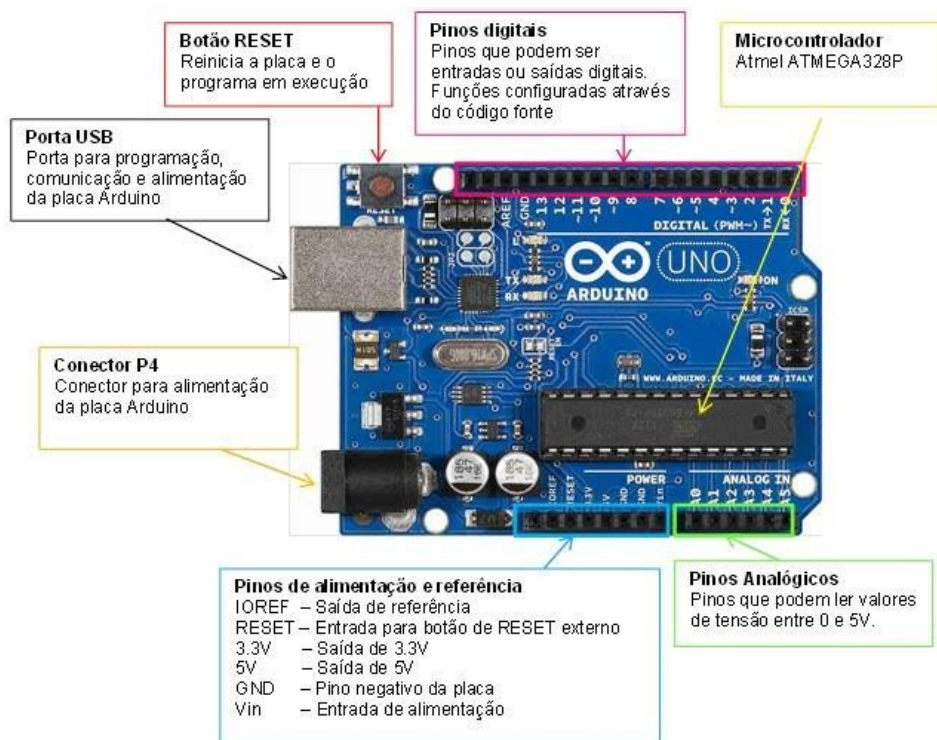


Fig. 1 – Descrição dos terminais e principais componentes da placa Arduino Uno R3. Fonte: <http://blog.baudaeletronica.com.br/plataforma-Arduino>.

A flexibilidade da plataforma, associada ao baixo custo, e à facilidade de encontrar códigos livres destinados a controlar diferentes sensores, facilita aos leigos implementarem projetos. E também propicia a execução de experimentos de física [28] que, por sua natureza eletrônica e prática, despertam o interesse do aluno, tanto durante a construção do aparato, [29] quanto nas etapas de experimentação [30]. O

entusiasmo vivenciado pelo aluno colabora para o desenvolvimento de novas habilidades, fortalece a relação entre aluno e escola, e pode despertar vocações para as carreiras tecnológicas [31].

A execução de comandos pelo Arduino se dá pelo microcontrolador. Para isso interliga-se, via USB, o hardware a um computador com o software Arduino IDE instalado. Este software é um ambiente de desenvolvimento baseado na linguagem C++ que permite ao usuário escrever o algoritmo e compilá-lo no controlador que o executará; lendo, interpretando e convertendo os sinais de entrada ou saída nos pinos do Arduino. Uma vez alimentado, o dispositivo lê os comandos armazenados no microcontrolador, sendo capaz de interpretar os sinais existentes nos pinos analógicos e digitais.

O Arduino tem sido utilizado para ensinar física, especialmente auxiliando nas atividades experimentais. Um artigo [32], por exemplo, descreve um experimento simples baseado em Arduino para estudar a queda livre. Os dados experimentais associados ao movimento de queda livre de um disco de latão são coletados com a ajuda de um sensor de distância ultrassônico e uma placa Arduino. As curvas de posição versus tempo, obtidas de diferentes alturas iniciais, são plotadas e a aceleração da gravidade é determinada experimentalmente usando o Excel.

Um outro trabalho [33], por exemplo, utilizou uma placa de Arduino para construir uma luva ultrassônica para detectar obstáculos à distância auxiliando na locomoção de pessoas desprovidas de visão. Algo que foi ao encontro de outro trabalho [34], que construiu “um protótipo de aplicativo mobile, integrando o smartphone e o Arduino, para auxiliar na geolocalização de deficientes visuais”.

Já em outro trabalho [35], utilizou-se o Arduino em aulas de astronomia para alunos cegos. Os autores construíram maquetes de planetas do sistema solar controladas pelo Arduino para variar sua temperatura.

Não encontramos na literatura outros trabalhos envolvendo projetos de acessibilidade com Arduino, entretanto sua aplicabilidade é extensa e, por isso, optamos por utilizá-lo para propor um experimento para alunos com deficiência visual de fácil replicação em sala de aula.

Sobre as primeiras determinações da aceleração gravitacional

Pode-se discutir o panorama de construção do conceito de gravidade, e suas interpretações ao longo dos anos, destacando as contribuições de Galileu, Descartes e Newton para a formulação atual.

Galileu (1564-1642) afirmou que o movimento de queda dos corpos "num meio cuja resistência fosse nula"[36], é um movimento uniformemente variado com a mesma aceleração para todos os corpos. Sua estimativa o levou, na época, a uma aceleração gravitacional de cerca de $4,0 \text{ m/s}^2$.

O padre Mersenne (1588-1648) fez diversas tentativas de determinar a aceleração gravitacional medindo tempos de queda [37]. Seus resultados levaram-no a valores da ordem de $8,0 \text{ m/s}^2$.

Enquanto Galileu relatava experimentos cujo tempo era medido através da determinação da massa de água que fluía de um tanque [36], Mersenne utiliza pêndulos em sua medição. Essas diferentes estratégias foram empregadas para contornar os problemas oriundos da dificuldade de realizar medidas precisas de tempo.

Posteriormente Huygens refez, em 1659, o último experimento de Mersenne encontrando valores entre $9,0 \text{ m/s}^2$ e $10,0 \text{ m/s}^2$ [37]. Tal divergência entre os resultados o conscientizou que, enquanto não houvesse um cronômetro confiável, não poderia medir com precisão o tempo de queda.

Já em 1666 Newton deduz a fórmula para calcular a força no movimento circular, por meio dela procurou comparar a aceleração centrípeta de um corpo em rotação junto com a Terra, com a aceleração gravitacional estimada por Galileu [38]. Insatisfeito com a aceleração de $4,0 \text{ m/s}^2$, encontrada por Galileu, e desconhecendo os resultados de Huygens, Newton calcula a gravidade utilizando um pêndulo cônico e obtém uma aceleração gravitacional de $10,2 \text{ m/s}^2$.

O cálculo de g

O módulo da aceleração da gravidade na superfície da Terra pode ser calculado pela equação (1) [39]:

$$a_g = \frac{GM}{r^2} \quad (1)$$

Em que $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$ é a constante de gravitação universal, $M = 5,98 \cdot 10^{24} \text{ Kg}$ é a massa aproximada da Terra e r é a distância da partícula ao centro da Terra.

Devido a distribuição não uniforme de massa da Terra, a aceleração da gravidade a_g varia discretamente de um ponto a outro da superfície da Terra [39]. E como a Terra possui um movimento de rotação, o peso de uma partícula, $m\vec{g}$, em que $\vec{g}$ é aceleração de queda livre, é ligeiramente menor que o módulo da força gravitacional [39]. A relação entre a aceleração da gravidade $\vec{a}_g$ e a aceleração de queda livre $\vec{g}$, considerando a rotação da Terra, é dada por:

$$\vec{a}_g = \vec{g} - \vec{\omega}^2 R \quad (2)$$

Sendo $\vec{\omega}$ a velocidade angular da Terra e R o raio da Terra. O termo $\omega^2 R$ representa a aceleração centrípeta de uma partícula girando na superfície da Terra. Observe que a diferença entre as acelerações $\vec{g}$ e $\vec{a}_g$ é igual a $\omega^2 R$ e é máxima no equador, uma vez que o raio R da circunferência descrita pela partícula é máximo no equador [39].

Note também que, se desprezarmos o efeito da rotação da Terra $\omega^2 R = 0$ e, assim, $\vec{a}_g = \vec{g}$, ou seja, a aceleração da gravidade $\vec{a}_g$ é igual a aceleração de queda livre ($\vec{g}$). Então, em nosso trabalho usaremos o termo aceleração da gravidade como sinônimo de aceleração de queda livre por não considerar os efeitos de rotação da Terra.

Considerando a Terra aproximadamente uma esfera homogênea de massa M e desprezando os efeitos rotacionais da Terra, o módulo da aceleração da gravidade, ou de queda livre para pontos na superfície da Terra ou bem próximo dela, pode ser calculada pela equação:

$$g = \frac{GM}{(R+h)^2} \quad (3)$$

Em que $R = 6,37 \cdot 10^6 \text{ m}$, representa o raio médio da Terra e h é a distância acima da superfície da Terra a um ponto P qualquer. Observe que $R + h = r$, que representa a distância do ponto P ao centro da Terra:

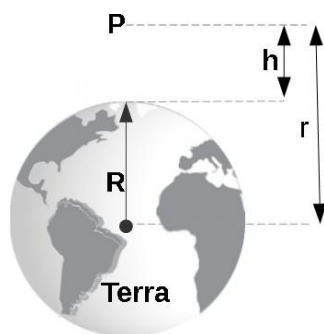


Fig. 2 – Representação de algumas distâncias para o cálculo da aceleração da gravidade.
Fonte: os autores.

Manipulando a equação (3) temos que:

$$g = \frac{GM}{(R+h)^2} = \frac{GM}{R^2 \left(1 + \frac{h}{R}\right)^2} = \frac{GM}{R^2} \left(1 + \frac{h}{R}\right)^{-2} \quad (4)$$

No contexto do nosso trabalho vamos medir a aceleração de queda livre de uma esfera caindo sucessivamente de alturas $h = 10,0 \text{ cm}$; $h = 21,0 \text{ cm}$; $h = 18,0 \text{ cm}$ e $h = 30,0 \text{ cm}$. Observe que todos esses valores de h são tais que $h \ll R$.

Pelo teorema binomial:

$$(1+x)^n = 1 + \frac{nx}{1!} + \frac{n(n-1)x^2}{2!} + \dots \text{para } x^2 < 1 \quad (5)$$

Podemos expandir o último termo da equação (4) até a primeira ordem, usando $n = -2$ e $x = h/R$, de forma a obtemos a seguinte expressão:

$$g = \frac{GM}{R^2} \left(1 - 2\frac{h}{R}\right) \quad (6)$$

Como $h \ll R$, o termo h/R tende para zero e assim a equação (6) se reduz à expressão (1), que será usada para uma estimativa teórica da aceleração de queda livre para corpos próximos à superfície terrestre.

Utilizando os valores de G , M e R , encontramos $g = 9,79 \text{ m/s}^2$ para pontos localizados próximos a superfície da Terra[15]. Este valor de g será utilizado por nós como estimativa teórica para o cálculo do desvio percentual relativo das nossas medidas.

MATERIAIS E MÉTODOS

Propõe-se um dispositivo multissensorial fabricado em MDF com espessura de $(3 \pm 0,5) \text{ mm}$. A estrutura tem $(40,0 \pm 0,05) \text{ cm}$ de altura e $(6,0 \pm 0,05) \text{ cm}$ de comprimento, sustentado por uma base de secção quadrada com $(20,0 \pm 0,05) \text{ mm}$ de largura e altura de $(8,0 \pm 0,05) \text{ mm}$, com indicações escritas em braile nas alturas de $(10,0 \pm 0,05) \text{ cm}$, $(18,0 \pm 0,05) \text{ cm}$ e $(30,0 \pm 0,05) \text{ cm}$, respectivamente. A Fig.3 apresenta uma ilustração do experimento, com detalhes dos locais em que há indicações em braile.

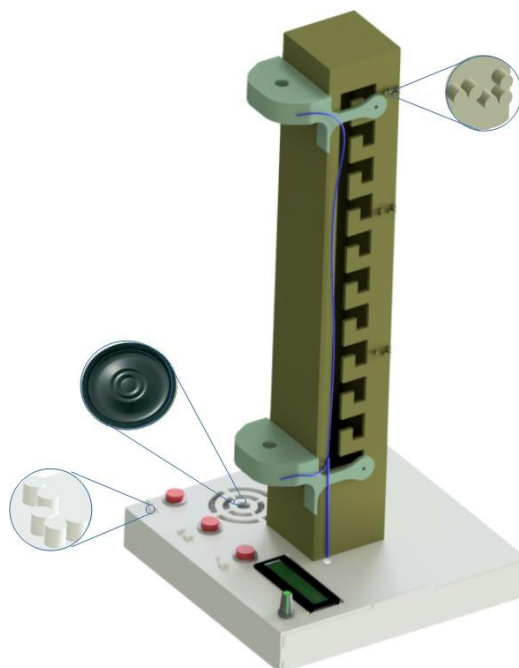


Fig. 3 – Ilustração do experimento com detalhes de alguns locais com indicação em braile.
Fonte: os autores.

O dispositivo utiliza o Arduino para cronometrar o tempo de queda de uma esfera disparada, a partir do repouso, de uma altura qualquer. Para isso utilizamos dois pares de sensores, um LED infravermelho como emissor e um fototransistor como receptor, um par fixado no suporte superior, e um no inferior.

O cálculo do módulo da aceleração gravitacional é realizado por um algoritmo no microcontrolador do Arduino, utilizando a equação $g = 2h/t^2$, uma vez que a velocidade inicial v_0 é nula. O resultado experimental é fornecido tanto no visor, que pode servir para orientação de alunos sem deficiência, quanto no alto-falante, por meio de arquivos de áudio armazenados em cartão micro SD (ver Fig. 4).

Ressalta-se que o experimento pode ser facilmente replicado. Todos os arquivos destinados a reprodução de áudio e construção do aparato são fornecidos em formatos já compatíveis. Através dos arquivos pode-se confeccionar a estrutura e os suportes em MDF, ou produzir este último em impressora 3d.

Os componentes eletrônicos utilizados na construção do experimento estão ilustrados na Fig.4

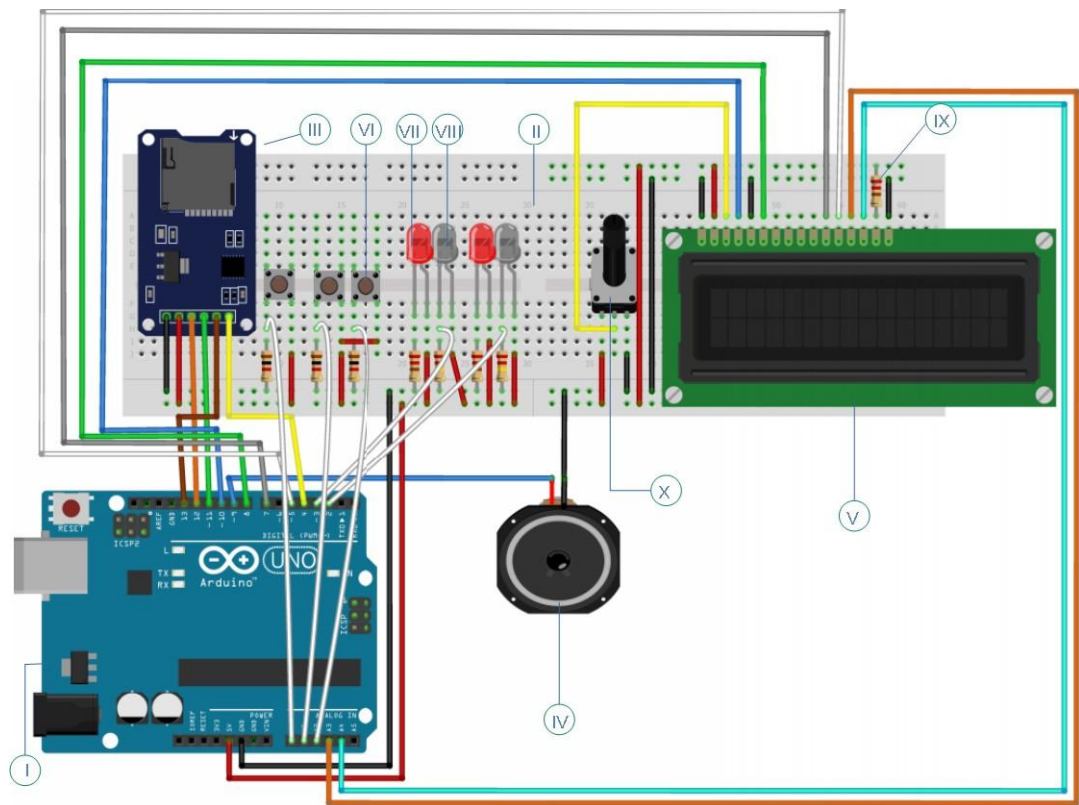


Fig. 4 – Circuito eletrônico. Fonte: os autores.

A lista completa de componentes utilizados no projeto são mostradas na Tabela 1:

Tabela 1 – Lista de componentes eletrônicos utilizados no projeto.

Quantidade	Componente	Função no protótipo
1	Arduino Uno (I)	Controlador responsável pela coleta dos dados
1	Protoboard (II)	Placa para inserir os componentes eletrônicos
1	Módulo SD (III)	Leitor de cartão de memória
1	Alto Falante (IV)	Emissor de som
1	Display 16x2 (V)	Visor de instruções e resultados
3	PushButton (VI)	Botão para selecionar a altura desejada
2	LED Infravermelho (VII)	Emissor de luz
2	Fototransistor (VIII)	Receptor de luz
1	Potenciômetro (100kΩ)	Ajustar o brilho do <i>display</i>
5	Resistores (IX)	Controlar a corrente elétrica no circuito

Na prática o Arduino possui limitações de memória disponível para trabalhar com arquivos de áudio. Por esse motivo interligamos um módulo de leitura de cartão Micro SD. Tal dispositivo é baseado em comunicação SPI (Serial Peripheral Interface), protocolo responsável por comunicar o dispositivo com os pinos SLI do Arduino. Para isso é necessário conectar os dispositivos conforme Tabela 2, e especificar as bibliotecas SLI e SD na plataforma IDE (Fig. 5).

Tabela 2 – Sequência de conexões na placa Arduino para o Módulo SD e Display.

Módulo SD	Placa Arduino	Display 16x2	Placa Arduino
CS	4 (amarelo)	VSS	GND (preto)

SCK	13 (marrom)	VDD	5V (vermelho)
MOSI	11 (verde)	V0	Potenciômetro(amarelo)
MISO	12 (laranja)	RS	12 (azul)
VCC	5V (vermelho)	RW	GND (Preto)
GND	GND (preto)	E	8 (verde)
-	-	D4	7 (cinza)
-	-	D5	5 (branco)
-	-	D6	A3 (laranja)
-	-	D7	A4 (ciano)
-	-	A	5V (vermelho)
-	-	K	GND (Preto)

Para reproduzir som é necessário a inclusão de uma terceira biblioteca, TMRpcm.h (Fig. 5) que possibilita o Arduino trabalhar com o padrão de Modulação por Código de Pulso (PCM). Esse método é usado para representar digitalmente amostras de sinais analógicos, possui baixa qualidade de som por parte, limitando-se à arquivos de áudio monofônico no formato WAV com 16 kHz de amostragem, 8 bits de resolução.

Código 1: Bibliotecas essenciais para controlar o áudio.

```
#include<SD.h>
#include<SLI.h>
#include<TMRpcm.h>
```

Figura 5: Parte do código referente à inclusão de bibliotecas. Fonte: Autores.

Quanto ao display, embora não seja obrigatório, optamos em utilizá-lo pois o aparato aqui produzido poderá ser utilizado também com alunos sem deficiência visual. Sua instalação consiste na conexão do dispositivo com a sequência de ligações de pinos da placa Arduino descrita na Tabela 2. A distribuição dos fios em cores distintas tem como objetivo facilitar a montagem. Sua utilização inicia-se com a inclusão da biblioteca responsável por controlá-lo (LiquidCrystal.h) seguido da especificação dos pinos utilizados pelo dispositivo, bem como o tipo do display, que nesse caso é (16x2), sendo capaz de mostrar 16 colunas e 2 linhas.

Código 2: Bibliotecas essenciais para controlar o visor.

```
#include<LiquidCrystal.h>
LiquidCrystallcd(10,8,7,5,A3,A4)
lcd.begin(162);
```

Figura 6: Parte do código referente à inclusão de bibliotecas. Fonte: Autores.

O esquema de ligação do display está apresentado na Fig.4 e requer apenas um resistor externo de 270 Ω para limitar a corrente elétrica do display em 20 mA e, a conexão do display sem esse resistor pode acarretar mal funcionamento ou mesmo danos irreversíveis ao componente.

Coleta de dados

O protótipo está apresentado na Fig.7. Diferentemente do trabalho de [15], nosso experimento possui sensores infravermelho, orientação por visor e braille e um sensor acústico acoplado à sua base, o que permite uma acessibilidade para alunos com deficiência visual.



Fig. 7 – Protótipo produzido para medir a aceleração gravitacional. Fonte: os autores.

O uso do dispositivo é altamente intuitivo, ao conectá-lo a uma fonte de alimentação inicia-se uma rotina de execução de áudios, instruindo os alunos a realizarem todas as etapas do experimento. Além disso os estudantes sem deficiência visual podem acompanhar as instruções pelo visor caso julguem necessário.

Para fornecer o resultado em áudio da gravidade foi necessário gravar vários arquivos no formato wav. Cada arquivo contém um valor de gravidade possível, porém cabe destacar que quanto maior a precisão adotada, maior será a quantidade de arquivos a ser gravada. Por exemplo, com uma casa decimal, de 9,0 a 10,0 seriam 11 valores. Já adotando duas casas decimais, de 9,00 a 10,00 seria 101. Para sermos coerentes com o critério de arredondamento dos valores de g aferidos pelo Arduino, optamos por gravar áudios considerando apenas uma casa decimal. E para melhorar a qualidade dos áudios utilizamos um conversor de texto em áudio.

O áudio introdutório detalha o formato da estrutura; especifica o número de botões, a quantidade de sensores e informa a presença de indicadores em braille. O experimento é realizado por etapas:

Inicialmente o aluno analisa a estrutura, depois, ajusta a altura dos sensores, selecionando com um botão a altura a partir da qual o objeto será abandonado:

Você iniciará um experimento para medir a aceleração da gravitacional. Vamos começar! Este experimento possui uma estrutura em forma de torre e uma base de sustentação. A torre existe um mecanismo para ajuste de altura identificado em braille. Já na base existe três botões para você especificar a altura simulada. Não se preocupe, existe uma grafia em braille em cada botão. Analise a estrutura. Eu aguardo! (ÁUDIO TRANSCRITO).

O Arduino possui um microcontrolador capaz de cronometrar o tempo transcorrido a partir de determinado momento. Neste experimento programamos o Arduino para iniciar a contagem do tempo com a liberação da esfera no suporte superior, e se encerrar no suporte inferior.

Em seguida será reproduzido um áudio informando a necessidade de inserir uma esfera, bem como o momento adequado para soltá-la. Caso a esfera seja disparada corretamente o resultado será apresentado no visor, seguido da reprodução audível do valor da aceleração da gravidade:

Muito bem! Você obteve uma aceleração gravitacional local de $9,8 \text{ m/s}^2$ (ÁUDIO TRANSCRITO).

Caso aconteça algum erro no procedimento experimental, o próprio dispositivo emitirá um som informando ao aluno para repetir o experimento:

Infelizmente ocorreu algum erro no experimento. Por gentileza, verifique se você ajustou corretamente o dispositivo. Após a verificação, execute o experimento novamente (ÁUDIO TRANSCRITO).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente verificamos se o som reproduzido tinha intensidade audível; se o visor apresentava as informações adequadas e se os botões e sensores funcionavam corretamente. Os resultados foram satisfatórios em todos os quesitos, sendo compatíveis com sua utilização numa sala de aula real.

Posteriormente realizamos algumas medições do tempo de queda da esfera, liberando-a sucessivamente das alturas de $(10,0 \pm 0,05) \text{ cm}$, $(21,0 \pm 0,05) \text{ cm}$, $(18,0 \pm 0,05) \text{ cm}$ e $(30,0 \pm 0,05) \text{ cm}$, lembrando que esses valores são demarcados em Braille na estrutura. Os valores da aceleração da gravidade obtidos com o experimento são calculados e apresentados no LCD.

Para aferir a sensibilidade do equipamento, e consistência nas medidas, realizamos quatro medidas de tempo para cada um dos valores de h mencionados anteriormente, os valores de tempo de queda obtidos são mostrados na Tabela 3:

$h = (10,0 \pm 0,05) \text{ cm}$	$h = (18,0 \pm 0,05) \text{ cm}$	$h = (21,0 \pm 0,05) \text{ cm}$	$h = (30,0 \pm 0,05) \text{ cm}$
$t \text{ (ms)}$	$t \text{ (ms)}$	$t \text{ (ms)}$	$t \text{ (ms)}$
144	190	208	248
142	193	208	247
143	192	205	246
144	191	207	248

Tabela 3 – Valores de tempo obtidos nas medidas. Fonte: Autores.

Com a média dos valores de tempo, da Tabela 3, para cada altura correspondente, fizemos um ajuste para a função quadrática, de acordo com a equação 7:

$$h(t) = h_0 + v_{y_0}t + \frac{gt^2}{2} \quad (7)$$

A equação (7) modela a situação de Movimento Retilíneo Uniformemente Variado (MRUV) e, para nosso caso, os parâmetros h_0 e v_{y_0} são nulos. Como resultado do ajuste quadrático, obtido por software, obtivemos como parâmetros $g/2 = 4,82 \text{ m/s}^2$, $v_{y_0} = 0,03 \text{ m/s}$ e $h_0 = 0,003 \text{ m}$. Esses resultados são apresentados no gráfico 1:

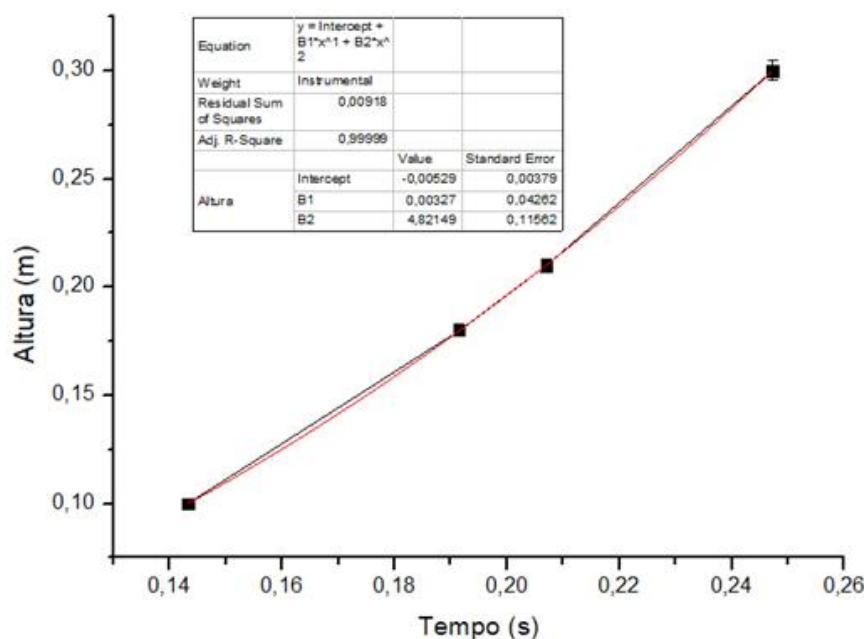


Gráfico 1: Ajuste quadrático para os pares ordenados tempo de queda *versus* altura de queda.

Para o ajuste em questão obtivemos um valor do módulo de $g = 9,64 \text{ m/s}^2$. Os valores dos parâmetros v_{y_0} e h_0 , não nulos, estão relacionados aos erros no experimento. Em relação à esses parâmetros, tanto o coeficiente de correlação obtido ($r^2 = 0,99$), quanto o erro percentual relativo das grandezas, indica que os desvios estão dentro de uma margem aceitável. O parâmetro $h_0 = 0,003$, por exemplo, representa apenas 1% da altura de lançamento $h = 30,0 \text{ cm}$. Para fins de cálculo de erro da medida de g , podemos usar como padrão o módulo de g mencionado em [15], de $g = 9,79 \text{ m/s}^2$, uma vez que cidade na qual o experimento foi realizado possui a mesma elevação em relação ao nível do mar de [15]. Portanto o erro percentual relativo [40] pode ser calculado como:

$$\frac{|9,79 - 9,64|}{9,79} \times 100 \approx 1,5\%$$

As principais fontes de erro do experimento foram originadas das oscilações no suporte que prendia a esfera, que a deslocava um pouco de sua posição de equilíbrio original no lançamento. Além disso o princípio de funcionamento do sensor que utilizamos é baseado na reflexão da luz, portanto fatores, como a dimensão do objeto, por exemplo, podem influenciar no sentido que o sensor pode ser ativado um pouco antes ou um pouco depois em relação à medidas anteriores. Esses são erros inerentes do experimento e não puderam ser minimizados nos testes.

O tempo de queda (t), em cada medida, permanece armazenado Arduino. Por isso inserimos a equação $g = 2h/t^2$, especificada no algoritmo compilado no Arduino. Na equação supracitada g representa a aceleração da gravidade e h , a altura em que a esfera é abandonada. Dessa forma para cada medida o valor de g é exibido no monitor LCD, com uma casa decimal por questões práticas já mencionadas na seção anterior.

Os resultados experimentais, consistentes em todos os testes, mostraram que o protótipo é bastante funcional e proporciona resultados com baixo erro experimental, considerando propósitos didáticos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os testes com o experimento apresentaram valores de aceleração gravitacional próximo ao estipulado pela teoria, com erro relativo de 1,5% aproximadamente. A modelagem da equação do movimento de queda livre, utilizando a média de dados obtidos em quatro alturas distintas, apresentou um coeficiente de correlação $r^2 = 0,99$. Em repetidos testes os dados foram consistentes. O protótipo mostrou além estabilidade no funcionamento, a capacidade de executar perfeitamente as instruções sonoras destinadas aos alunos com deficiência visual.

Acreditamos que este protótipo, com paralelo ainda inexistente na literatura, pode ser utilizado com sucesso numa sala de aula para contribuir com a inserção e autonomia de alunos com deficiência visual. Para viabilizar sua utilização disponibilizamos todo o código e instruções do projeto na internet. Outro fator importante na utilização do protótipo foi o fato de que o aparato apresenta um conjunto único, então pode ser transportado com facilidade se for necessário, sem a necessidade de montagem e desmontagem do experimento antes da utilização, o que é um fator distinto em relação à outros protótipos já mencionados aqui.

Nossas análises apontaram para a possibilidade de aprimoramentos futuros, como a utilização do protocolo I2C na comunicação com o LCD, o que deixaria mais pinos do Arduino disponíveis para acoplar mais sensores, ou botões ao protótipo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] C. E. Laburú; M. Mamprin; W. N. C. Salvadego. Londrina: Eduel, (2011).
- [2] J. Lavonen et al. International Journal of Science Education, **26**, 309 (2004).
- [3] M. S. T. D. Araújo; M. L. V. D. S. Abib. Rev. Bras. de Ens. de Física, **25**, 176 (2003).
- [4] L. S. Vygotsky et al. Linguagem, desenvolvimento e aprendizagem. [s.l.]: **Ícone**, (2005).
- [5] M. Krasilchik. Prática de ensino de biologia. [s.l.]: Edusp, (2004).
- [6] M. D. C. Galiazzi et al. Ciênc. educ.(Bauru), **7**, 249 (2001).
- [7] A. T. Borges. Cad. Bras. de Ens. de Física, **19**, 291 (2002).
- [8] N. A. Grandini; C. R. Grandini. Rev. Bras. de Ens. de Física, **26**, 251 (2004).
- [9] F. D. A. Lima. Monografia, curso de graduação em Física, **UEC**, (2011).
- [10] D. B. Sias; R. M. R. Teixeira. Cad. Bras. de Ens. de Física, **23**, 361 (2006).
- [11] E. D. Camargo. Tese de Doutorado em Educação, UNICAMP, SP, (2005).
- [12] M. T. E. Mantoan. O desafio das diferenças nas escolas, **5**, 59 (2008).
- [13] E. P. D. Camargo. Física na Escola, **8** (2007).
- [14] V. S. Guimarães et. al. Rev. Bras. de Infor. na Educação. **21**, 78 (2013).
- [15] H. Cordova; A. Tort. Rev. Bras. de Ens. de Física, **38**, e2308 (2016).
- [16] Guaitolini Junior et al, Cad. Bras. de Ens. de Física, **33**, 619 (2016).
- [17] T. D. Admiral; I. S. Cunha, L. P. T. Do Carmo. Ensino em Foco, **3**, 35, (2020).
- [18] J. Borges; E. Silva; Z. Santos. XI Encontro de Pesquisa em Ensino de Física. Curitiba, PR, (2008).
- [19] E. P. de Camargo; R. Nardi. Rev. electr. de invest. en educ. en ciencias, **3**, 35 (2008).

- [20] E. P. de Camargo; NARDI, R. Rev. de Educ. em Ciência e Tecnologia, **1**, 81, (2008).
- [21] A. L. Rizzo; S. Bortolini; P. V. dos S. Rebeque. Rev. Bras. de Pesq. em Educação em ciências, **14**, 191, (2014).
- [22] L. Camargo et. al. Simpósio Nacional de Ensino de Física, **XXI**, 1, (2015).
- [23] B. Ferreira; M. Gaspar; A. Azevedo. Simpósio Nacional de Ensino de Física, **XXI**, 1, (2015).
- [24] E. P. de Camargo; D. da Silva. Ens., Saúde e Amb., **2**, 1, (2009).
- [25] S. C. Hallais, et al. Rev. de Ed., Ciências e Matemática, **7**, 1, (2017).
- [26] E. D. de Camargo; D. d. Silva; J. D. Filho. Invest. em Ens. de Ciências, **11**, 343, (2006).
- [27] M. P. C. Moreira, et al. Cad. Bras. de Ens. de Física, **35**, 721, (2018).
- [28] A. Santos; H. Amorim; C. Dereczynski Rev. Bras. de Ens. de Física, **39**, (2017).
- [29] SILVA, S. L. D. et al. Cad. Bras. de Ens. de Física, **33**, 619, (2016).
- [30] G. Kelly; D. Rocha; R. Germano Rev. Bras. de Ens. de Ciência e Tecnologia, **10**, 17, (2017).
- [31] F. S. da Rocha; G. F. Maranguello; L M. M. Lucchese. Cad. Bras. de Ens. de Física, **31**, 98, (2014).
- [32] A. Moya. Physics Education, **53**, 055020, (2018).
- [33] G. Gonzalez, et al. Rev. Univap, **22**, 475, (2017).
- [34] A. B. S. Ramos, et al. Grupo de Pesquisa Metodologias em Ensino e Aprendizagem em Ciências, **8**, 18, (2019).
- [35] M. S. Almeida, et al. Rev. Bras. de Ens. de Física, **42**, (2020).
- [36] G. Galilei. Duas novas ciências [Discorsi]. [S.l.] Ched Editorial, SP, (1985).
- [37] F. L. da Silveira. Instituto de Física, UFRGS, Porto Alegre, (2006).
- [38] R. S. Westfall. A vida de Isaac Newton. [s.l.]: Nova Fronteira, (1995).
- [39] D. Halliday; R. Resnick; J. Walker. Fundamentos de física. Vol. I. [S.l.]: Grupo Gen-LTC, (2016).
- [40] P. Cabral. Laboratório de metrologia e ensaios. (2004). Disponível em <http://www.peb.ufrj.br/cursos/ErrosIncertezas.pdf>. Acesso em 25 de março, (2021).