

Medida de g com a placa Arduino em um experimento simples de queda-livre

H Cordova * & A C Tort †
Mestrado Profissional em Ensino de Física – Instituto de Física
Universidade Federal do Rio de Janeiro
Caixa Postal 68.528; CEP 21941-972 Rio de Janeiro, Brazil

18 de Novembro de 2015

Resumo

Um modo simples de medir a aceleração da gravidade g no laboratório de física do ensino médio e de física básica no ensino universitário com um microcontrolador da família Arduino é proposto. Resultados experimentais com um erro relativo de 0,1% são apresentados e comparados com o valor local de g medido pelo Observatório Nacional, Rio de Janeiro.

Palavras-chave: aceleração da gravidade, queda-livre, Arduino,

*e-mail: hercilioc@hotmail.com

†e-mail: tort@if.ufrj.br.

1 Introdução

Um dos muitos modos possíveis de medir a aceleração da gravidade g é deixar cair verticalmente um corpo a partir de uma altura pré-determinada h e medir a duração do seu tempo de queda. Como a velocidade inicial é nula, segue que:

$$g = \frac{2h}{t^2}, \quad (1)$$

onde t é a duração da queda. Embora a Eq. (1) possa ser introduzida nos primeiros estágios do ensino da cinemática e seja o fundamento de uma das maneiras mais simples de medir g , a rapidez com que a queda-livre acontece pode tornar o experimento frustrante para um iniciante. É possível melhorar os resultados por meio de circuitos eletrônicos capazes de determinar intervalos de tempo com pelo menos 1/10 de milissegundo de resolução, veja por exemplo [1], mas estas técnicas são mais apropriadas para os laboratórios didáticos avançados dos cursos de graduação. Por outro lado, o uso cada vez mais difundido dos modernos microcontroladores de baixo custo, como por exemplo, a família de microcontroladores ou placas Arduíno [2, 3, 4], capazes de medir intervalos de tempo na faixa de mili e microssegundos permite obter resultados perfeitamente aceitáveis no laboratório de física do ensino médio e de física básica no ensino universitário, mesmo que em uma primeira abordagem, por conveniência pedagógica, desprezemos os efeitos da resistência do ar e outros efeitos espúrios. Nas próximas seções discutiremos como isto pode ser feito.

2 Arranjo experimental

O arranjo experimental é mostrado na Figura 1. Uma pequena esfera de aço de 9 mm de diâmetro está inicialmente presa entre duas alavancas metálicas, uma fixa e outra móvel. Estas duas alavancas fazem parte do sensor superior, veja a Figura 2. Enquanto a esfera de aço estiver presa e logo em contato com as alavancas, teremos uma voltagem de 5V (nível alto) na porta 12 da placa Arduíno. Quando a alavanca móvel é acionada e a esfera liberada, o circuito fica aberto e a voltagem cai para 0V (nível baixo) na porta 12. Depois de cair uma altura pré-determinada h , a esfera atinge o sensor inferior – Figura 2 – que consiste em uma base de madeira móvel ligeiramente inclinada que sob o efeito do impacto com a esfera aciona um contato elétrico levando a porta 11 do Arduíno para nível alto. Assim que a esfera rola para fora da base esta porta retorna ao nível baixo, veja o esquema da Figura 3. O microcontrolador Arduíno registra o instante da liberação e do impacto, logo, a duração do tempo queda, depois permanece inativo durante 10 segundos antes de estar pronto para a próxima medida. A esfera é então recolocada na posição inicial levando o sensor superior novamente para o nível alto, permitindo uma nova medida. O código-fonte utilizado está reproduzido no Apêndice. No sensor superior há um furo de 1 mm de diâmetro onde a esfera deve ser encaixada, garantindo sempre o mesmo ponto de lançamento sem risco de mudança na altura. A altura medida é a distância entre o ponto de impacto da esfera no sensor inferior e a sua parte inferior, quando esta ainda está presa no sensor superior, assim o diâmetro da esfera não causa erros. A altura h foi medida com uma trena metálica com divisões de 1 mm. O espaço entre os contatos elétricos do sensor inferior é muito inferior a 1 mm. Convém ressaltar que a esfera metálica, assim como os contatos metálicos dos sensores, devem

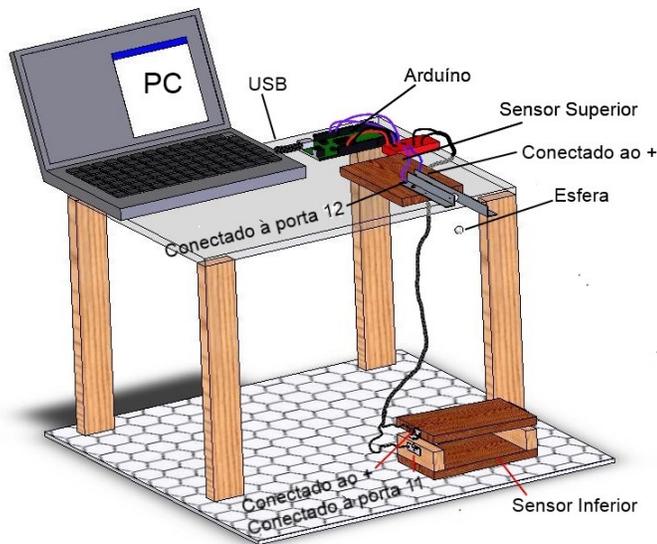


Figura 1: Visão geral do arranjo experimental.

estar perfeitamente limpos para evitar interrupções indevidas na comunicação com a placa Arduino. O código-fonte para aquisição de dados com Arduino é mostrado no Apêndice. Informações sobre a programação da placa Arduino, veja por exemplo, [4] e referências ali citadas.

3 Resultados experimentais

Para $h = 0,943$ m com $\delta h = 0,001$ m e $\delta t = 0,001$ s, os tempos de queda vertical a partir do repouso são mostrados na Tabela 1.

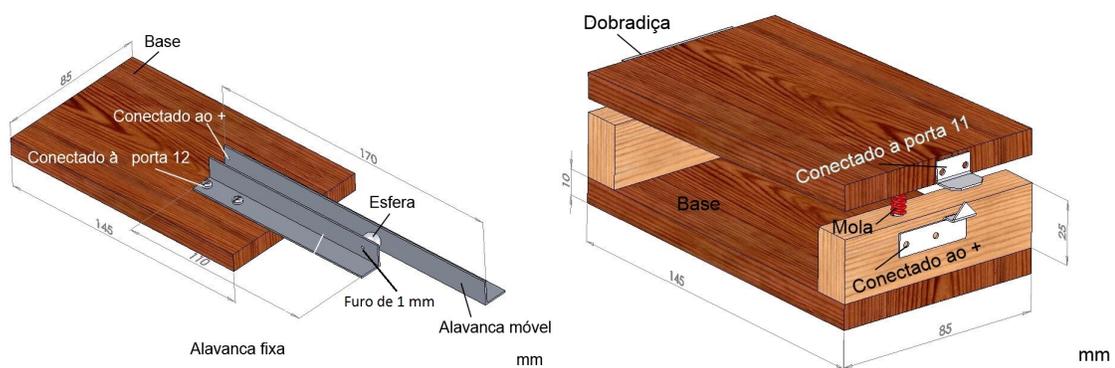


Figura 2: Sensores superior (esquerda) e inferior (direita). No desenho, por clareza, o espaço entre os contatos elétricos no sensor inferior está exagerado, no experimento ele é inferior a 1 mm.

Med.	t_i (s)	Med.	t_i (s)	Med.	t_i (s)
1	0,439	8	0,439	15	0,439
2	0,439	9	0,439	16	0,439
3	0,440	10	0,440	17	0,439
4	0,439	11	0,439	18	0,439
5	0,439	12	0,440	19	0,439
6	0,439	13	0,440	20	0,439
7	0,438	14	0,440	21	0,439

Tabela 1: Medidas dos tempos de queda-livre. A duração média da queda é de 0,439 s.

Os valores obtidos para g_i correspondem ao valor médio de cada medida obtido a partir da equação (1) da seguinte forma:

$$\bar{g}_i = \frac{g_{i\text{ máx}} + g_{i\text{ mín}}}{2}, \quad (2)$$

onde

$$g_{i\text{ máx}} = \frac{2(h + \delta h)}{(t_i - \delta t)^2}; \quad (3)$$

e

$$g_{i\text{ mín}} = \frac{2(h - \delta h)}{(t_i + \delta t)^2}. \quad (4)$$

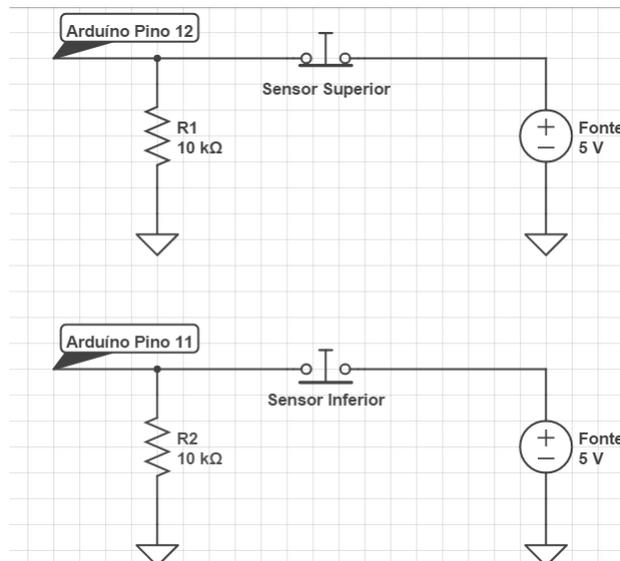


Figura 3: Circuito de apoio.

A incerteza individual δg_i pode ser calculada com a expressão

$$\delta g_i = \frac{g_i^{\text{máx}} - g_i^{\text{mín}}}{2}, \quad (5)$$

ou do modo usual [6]. O resultado é $\delta g_i = 0,055 \text{ m/s}^2$ para todas as vinte e uma medidas individuais. Os resultados para \bar{g}_1 são mostrados na Tabela 2. O valor médio de g_i é $9,778 \text{ m/s}^2$ e o desvio padrão da média ou erro padrão é $0,012 \text{ m/s}^2$, logo o experimento nos dá

$$g_{\text{exp.}} = 9,78 \pm 0,01 \text{ m/s}^2. \quad (6)$$

Med.	\bar{g}_i (m/s ²)	Med.	\bar{g}_i (m/s ²)	Med.	\bar{g}_i (m/s ²)
1	9,786	8	9,786	15	9,786
2	9,786	9	9,786	16	9,786
3	9,742	10	9,742	17	9,786
4	9,786	11	9,786	18	9,786
5	9,786	12	9,742	19	9,786
6	9,786	13	9,742	20	9,786
7	9,831	14	9,742	21	9,786

Tabela 2: Valores de \bar{g}_i ; a incerteza de cada medida individual é $\delta g_i = \delta g = 0,055 \text{ m/s}^2$.

O resultado dado pela Eq. (6) deve ser comparado com uma aproximação apropriada ao valor de g local medido por Souza e Santos do Observatório Nacional [7] em 2010,

$$g_{\text{Rio de Janeiro}} = 978\,789,852 \pm 0,011 \text{ mGal}, \quad (7)$$

onde $1 \text{ mGal} = 1 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$. Para fins de comparação com o resultado experimental obtido basta que consideremos o valor aproximado

$$g_{\text{Rio.}} \approx 9,79 \text{ m/s}^2. \quad (8)$$

O desvio percentual relativo é

$$\frac{|9,79 - 9,78|}{9,79} \times 100 \approx 0,1\%. \quad (9)$$

Nosso resultado pode também ser comparado com os obtidos com outros métodos, veja por exemplo, as referências [5, 8, 9, 10]. É possível medir também com o modelo de placa Arduino que utilizamos (Mega 2560) intervalos de tempo com precisão de microssegundos, mas, no caso do arranjo experimental proposto, os registros das durações temporais são instáveis e muitos dados devem ser descartados, o que nos parece inconveniente desde um ponto de vista pedagógico.

4 Conclusões

Como mencionado anteriormente, por simplicidade, os efeitos de resistência do ar não são levados em conta. Desde que h seja uma altura inferior a 1 metro tais efeitos podem ser desconsiderados em uma primeira abordagem, assim como o atraso na liberação da esfera. O fator que realmente diferencia a proposta experimental no nível de um laboratório de física básica que apresentamos aqui é a possibilidade de medir intervalos de tempo com precisão de milissegundos com um arranjo simples e de baixo custo. Observe também que embora projetado para o laboratório básico nos níveis médio e universitário, este experimento pode ser realizado facilmente em casa por um aluno ou um amador interessado.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao colega Dr. V. Soares pela leitura crítica do manuscrito original.

Referências

- [1] J. A. Blackburn e R. Koenig *Precision falling body experiment* Am. J. Phys. **44**, 855-857 (1976).
- [2] M. A. Cavalcante, A. Bonizzia e L. C. P. Gomes *Aquisição de dados em laboratórios de física: um método simples e de baixo custo para experimentos em mecânica*, Rev. Bras. En. Fís. **30** (2) 2501 (2008).
- [3] M. A. Cavalcante, C. R. C. Tavolar e E. Molisani *Física com Arduino para iniciantes*, Rev. Bras. En. Fís. **33** (4) 4503 (2011).
- [4] A. R. de Souza, A. C. Paixão, D. D. Uzêda, M. A. Dias, S. Duarte e H. S. de Amorim *Revista Brasileira de Ensino de Física A placa Arduino: uma opção de baixo custo para experiências de física assistidas pelo PC* **33**, (1) 1702 (2011).
- [5] C. E. Aguiar e F. Laudaes, *Listening to the coefficient of restitution and the gravitational acceleration of a bouncing ball*, Am. J. Phys. **71**, 499-501 (Maio 2003).
- [6] J. G. Taylor *An Introduction to Error Analysis* 2nd ed. (University Science Books; Boulder, 1982).
- [7] M. A. de Souza e A. A. dos Santos *Absolute gravimetry on the Agulhas Negras calibration line*, Rev. Bras. Geof. **28** (2) 2010.
- [8] J. A. White, A. Medina, F. L. Román, and S. Velasco, *A Measurement of g Listening to Falling Balls*, Phys. Teach. **45** 175-177 (Março 2007)
- [9] R. De Luca e S. Ganci *A measurement of g with a ring pendulum*, Rev. Bras. En. Fís. **33** (3) 3301 (2011).
- [10] O. Schwarz, P. Vogt e J. Kunh: *Acoustic measurements of bouncing balls and the determination of gravitational acceleration*, Phys. Teach. **51** 312-313 (Maio 2013).

Apêndice: código de aquisição de dados com Arduino

Por razões pedagógicas, o código-fonte utilizado é simples e procura obter apenas o tempo de duração da queda. Para maiores informações sobre a programação da placa Arduino ver [4].

```
int sensorSUP = 12;
int sensorINF = 11;
int estadoSUP;
unsigned long startTime;
unsigned long stopTime;
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode (sensorSUP, INPUT);
  pinMode (sensorINF, INPUT);
  estadoSUP = 1 ;
  Serial.println("Pronto para medir o tempo de queda");
  Serial.println("                ");
}
void loop()
{
  if (digitalRead(sensorSUP) == LOW && (digitalRead(sensorINF)) == LOW && estadoSUP == 1)
  {
    startTime = millis();
    Serial.print(" Inicio da medida ---");
    Serial.print("Esfera caindo...Contanto tempo...");
    estadoSUP = 0;
  }
  if (digitalRead(sensorINF) == HIGH && (digitalRead(sensorSUP)) == LOW)
  {
    estadoSUP = 1;
    stopTime = ( millis() - startTime);
    Serial.print("Tempo de queda = ");
    Serial.print(stopTime);
    Serial.print(" milisegundos (ms)| Aguarde 10 segundos...");
    delay(10000);
    Serial.println("Pronto para proxima medida");
  }
}
```