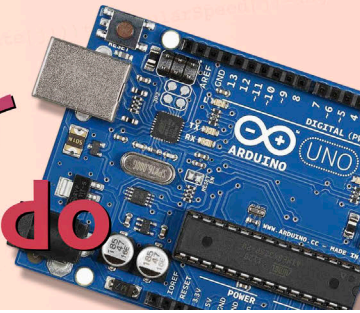


Produção de experimento didático com Arduino para estudo do

movimento circular uniformemente variado



Hélio Veloso Estevão¹
Ricardo Gondim Sarmento^{1,#}
Nilton Ferreira Frazão^{2,3}
Michelle de Paula Madeira⁴

¹Centro de Ciências da Natureza, Universidade Federal do Piauí, Teresina, PI, Brasil.

²Centro de Educação e Saúde, Universidade Federal de Campina Grande, Cuité, PB, Brasil.

³Departamento de Física, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil.

⁴Curso de Licenciatura em Educação do Campo, Universidade Federal do Piauí, Floriano, PI, Brasil.

RESUMO

O artigo apresenta um experimento didático elaborado com Arduino e materiais alternativos para estudar o movimento circular uniformemente variado, analisando as grandezas físicas: posição angular, velocidade angular e aceleração angular. O experimento consiste em um disco suspenso em rotação e em um mecanismo de contato, próximo ao disco, que, conectado ao Arduino, coleta os dados dos tempos e do número de voltas do disco para a realização dos cálculos das grandezas físicas computacionalmente. Nos cálculos das grandezas físicas, foi utilizado o método de derivação e, nos ajustes das curvas experimentais, o método dos mínimos quadrados. A descrição, a montagem e o funcionamento do experimento didático são apresentados de forma detalhada para uma possível reprodução e utilização nas aulas de física no Ensino Médio. Os resultados experimentais apresentaram concordância com o modelo teórico. Dessa forma, o experimento reproduz o movimento circular uniformemente variável e permite calcular as grandezas físicas do sistema, o que abre uma ampla possibilidade de aplicação no ensino.

Palavras-chave: física; Ensino Médio; movimento circular uniformemente variado



1. Introdução

O movimento circular uniformemente variado, ou simplesmente MCUV, ocorre quando uma partícula realiza trajetória circular, de raio constante, com velocidade angular variável no tempo [1]. Esse tipo de movimento é bastante frequente no cotidiano e está presente em bicicletas, veículos automotores, fábricas e brinquedos do tipo pião. O MCUV faz parte do conteúdo de física do Ensino Médio e a descrição do movimento exige alguns formalismos matemáticos que, para muitos alunos, torna o assunto de difícil assimilação. O professor apresenta em sala de aula exemplos de móveis em MCUV como recurso didático para aprendizagem do alunado, mas dificilmente conseguirá demonstrar somente com isso as grandezas físicas. Um recurso didático que pode ampliar a percepção do movimento é o experimento, em virtude da realização de simulações dos fenômenos e mensurações das grandezas físicas envolvidas no sistema do MCUV. Além disso, o uso de experimento torna o ensino de física diferenciado e atrativo, comparando-o com as aulas habituais, em que o professor ministra o assunto, explica e resolve exercícios modelos [2]. Na verdade, o experimento didático funciona como um instrumento auxiliar para o professor em sua práxis e, para o aluno, como ferramenta útil no processo da aprendizagem, visto que ele pode relacionar as teorias em sala de aula com a prática experimental [3, 4].

Atualmente, os experimentos didáticos de apoio à aprendizagem são cada vez mais populares e produzidos com materiais alternativos, realizados no ensino básico. Alguns experimentos são auxiliados por aparatos tecnológicos, sendo integrados ao computador por meio de uma plataforma de prototipagem eletrônica de código aberto, conhecido como Arduino [5]. Ele recebe os dados do experimento e os transmite ao computador para gerar resultados das grandezas físicas do sistema. Pesquisas como o de Cardoso e Zannin [6], que trata da proposta experimental para análise das variáveis de estado dos gases; o de Admiral e cols. [7], sobre a proposta didática para medição experimental da gravidade direcionada aos alunos com e sem

deficiência intelectual; o de Júnior e cols. [8], sobre o estudo do som emitido por cordas vibrantes; e o de Sinimbu e cols. [9], que aborda o experimento didático com Arduino para o estudo do MRUV, são exemplos de aplicação de experimentos didáticos feitos com Ar-

duino. Esse experimento envolve o ensino de física e visa despertar no aluno a motivação para compreender o conhecimento científico. Acompanhando essa tendência, o presente artigo tem como objetivo propor um experimento didático desenvolvido com materiais alternativos integrados ao computador por meio do Arduino para estudar o MCUV, com base nas grandezas físicas de posição angular, de velocidade angular e de aceleração angular.

Um recurso didático que pode ampliar a percepção do movimento é o experimento, em virtude da realização de simulações dos fenômenos e mensurações das grandezas físicas envolvidas no sistema do MCUV

#Endereço de correspondência. E-mail: ricardogondim@ufpi.edu.br.

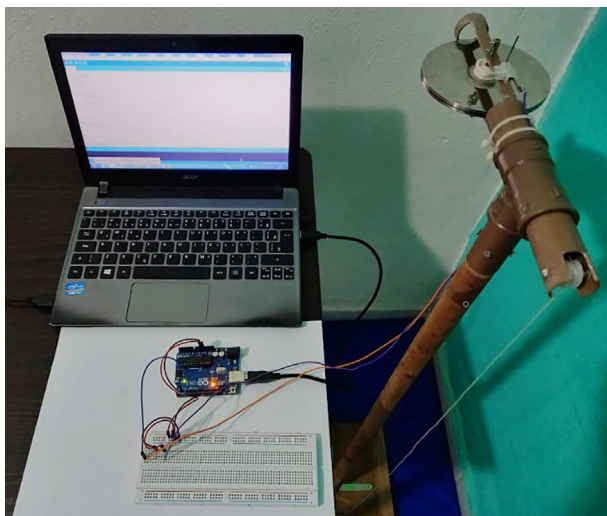


Figura 1 - Visão geral do aparato experimental.

2. Descrição, montagem e funcionamento do experimento didático

O experimento didático com Arduino, Fig. 1, foi desenvolvido para realizar medidas da posição angular, da velocidade angular e da aceleração angular, todos em função do tempo, de um ponto material em MCUV. O experimento didático é integrado ao computador por meio do Arduino e seu funcionamento ocorre da seguinte forma: um disco suspenso presente no experimento executa uma rotação sobre um plano horizontal e um mecanismo de contato, próximo ao disco, está conectado ao Arduino coletando os tempos e os números de voltas completas do disco e enviando essas informações ao computador que executa em tempo real os cálculos das grandezas físicas do MCUV: posição angular *versus* tempo, velocidade angular *versus* tempo e aceleração angular *versus* tempo.

O aparato experimental empregado para o estudo do MCUV é composto de: computador, placa de Arduino, fios, resistor e do experimento didático confeccionado com materiais alternativos feito de tubo e conectores de PVC, cabo de vassoura, base de madeira e barbante, como forma de suprir a ausência de equipamentos ou materiais

disponíveis em escolas do Ensino Médio, necessários para realizar as atividades experimentais. A escolha dos materiais alternativos no experimento se deve à presença de conectores utilizados para a montagem ou o ajuste do aparato experimental, na mobilidade pelo docente e na utilização pelos discentes.

No que concerne o experimento didático, ele é formado por uma haste de madeira posicionada na vertical com uma das extremidades presa à base de madeira e a outra acoplada a uma estrutura de cano de PVC em forma de “T”, conforme a Fig. 2(a). Em “T”, há duas polias e um disco: a primeira polia está unida ao disco coaxialmente, ambos na posição horizontal, e a segunda polia está afastada do disco, na posição vertical. Uma das extremidades do barbante é amarrada na primeira polia e enrolada em torno dela; a outra extremidade passa pela segunda polia e é tracionada por um objeto. O experimento tem início quando o objeto, que está preso no barbante, se movimenta

verticalmente para baixo, fazendo o conjunto polia, disco e eixo metálico rotacionarem de forma acelerada. A conexão do experimento com o Arduino ocorre através de dois fios, onde um deles é mantido fixo na parte inferior do

verticalmente para baixo, fazendo o conjunto polia, disco e eixo metálico rotacionarem de forma acelerada. A conexão do experimento com o Arduino ocorre através de dois fios, onde um deles é mantido fixo na parte inferior do

eixo metálico e o outro na parte superior, que só fará contato com o eixo do disco quando o ponteiro metálico completar uma volta. Assim, o circuito fecha e o Arduino registra os dados no computador, e, quando não houver contato, o circuito ficará aberto e nada acontecerá. Vale ressaltar que o experimento utiliza o mecanismo de contato para extração de dados, em vez de sensores comerciais, como forma de simplificar o experimento e a sua reprodução.

O experimento didático descrito tem uma construção bastante simples, mas que demanda detalhamentos. A montagem do experimento mostrado na Fig. 2 pode ser realizada adotando os seguintes procedimentos:

- Fixe perpendicularmente uma extremidade da haste de madeira, ou do cabo de vassoura, de aproximadamente 1 m de comprimento em uma base de madeira, Fig. 2(b).
- Fixe a extremidade superior da haste de madeira em um “T” soldável 25 mm, Fig. 2(c).
- Separe um pedaço de cano de PVC 25 mm, de 5 cm de comprimento. Em uma das extremidades dessa peça, faça cortes em forma de “U” para acomodar uma polia. Em seguida, encaixe essa peça no lado esquerdo do “T” soldável, Fig. 2(c). Observação: para a polia deste experimento, foi utilizado um puxador de varal de teto.
- Separe outro pedaço de cano de PVC 25 mm, de 16 cm de comprimento. Faça duas aberturas laterais na peça, no formato de um retângulo, e a encaixe no lado direito do T soldável, Fig. 2(d).
- Cole uma polia coaxialmente a um disco, juntamente a um eixo metálico. Em seguida, encaixe-o na abertura retangular da peça anterior, de modo a permitir que o conjunto do disco gire livremente, Fig. 2(d).
- Na parte superior do eixo metálico, encaixe um ponteiro feito com folha de alumínio, que terá a função de chave do circuito, à medida que o disco completa uma volta; na parte inferior, é estabelecido um contato direto com o circuito, Fig. 2(d). Por fim, amarre uma das extremidades do barbante, de aproximadamente 1 m comprimento, na primeira polia, conforme a Fig. 2(d), e passe a outra extremidade pela segunda polia, como na Fig. 2(e). Faça um pequeno laço no barbante para sustentar um objeto de 25 g.

O aparato experimental empregado para o estudo do MCUV é composto de: computador, placa de Arduino, fios, resistor e do experimento didático confeccionado com materiais alternativos feito de tubo e conectores de PVC, cabo de vassoura, base de madeira e barbante, como forma de suprir a ausência de equipamentos ou materiais disponíveis em escolas do Ensino Médio, necessários para realizar as atividades experimentais

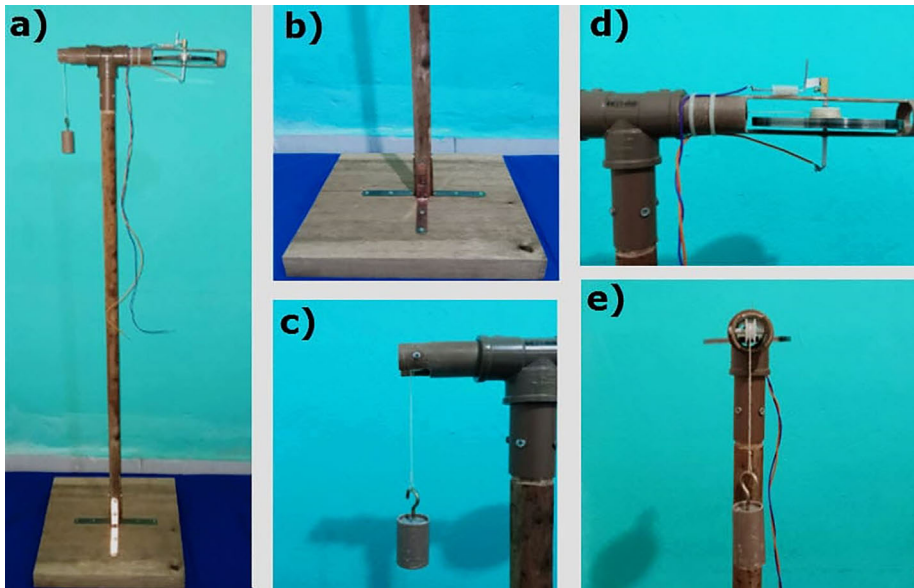


Figura 2 - Imagens do experimento didático com alguns detalhes da construção: (a) visão geral do experimento didático; (b) base de sustentação; (c) objeto suspenso; (d) visão de perfil da acoplagem do disco e do ponteiro; (e) suporte para o movimento do objeto.

Após a montagem do experimento didático, conecte os dois fios do experimento na *protoboard*, conforme a Fig. 3. Assim, o aparato experimental estará pronto para o funcionamento, que ocorre da seguinte forma: enrole o barbante na primeira polia até que o objeto atinja a segunda polia e, em seguida, solte-o. O disco rotacionará de maneira acelerada e, a cada contato do ponteiro com a haste metálica, uma contagem do tempo é coletada pelo Arduino. Saiba-se que a cada contato do ponteiro

com a haste metálica, o disco realiza um múltiplo inteiro de θ , posição angular de um ponto material, ou seja, $\theta = i\Delta\theta$, com $\Delta\theta = 2\pi$ rad e $i = 1, 2, \dots, n$, sendo n o número de voltas. Assim, é possível, entre outras possibilidades, estudar a relação da posição angular *versus* tempo, da velocidade angular *versus* tempo e da aceleração angular *versus* tempo. Para relacionar a posição angular *versus* tempo, assumimos o registro do primeiro contato do ponteiro com a haste, sendo $t_0 = 0$ e $\theta_0 = 2\pi$, do segundo

contato, o tempo será t_1 e a posição angular será $\theta(t_1) = \theta_1 = 2(2\pi)$, do terceiro contato, o tempo será t_2 e a posição angular será $\theta(t_2) = \theta_2 = 3(2\pi)$, e assim sucessivamente. A partir das informações da posição angular e do tempo, a velocidade angular instantânea ω pode ser calculada pela seguinte expressão

$$\omega = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\theta_j - \theta_{j-1}}{t_j - t_{j-1}} \equiv \frac{d\theta}{dt}, \quad (1)$$

onde θ é a posição angular em rad, t é o tempo em s, j é o número de contato entre o ponteiro com a haste metálica e $j - 1$ é o número de contato entre o ponteiro com a haste metálica subsequente. O termo $d\theta/dt$ é a derivada de $\theta(t)$ no instante t .

A aceleração angular instantânea α pode ser obtida desta forma

$$\alpha = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\omega_j - \omega_{j-1}}{t_j - t_{j-1}} \equiv \frac{d\omega}{dt}, \quad (2)$$

onde ω é a velocidade angular em rad/s, t é o tempo em s correspondente e $d\omega/dt$ é a derivada de $\omega(t)$ no instante t . Diante das informações da posição angular com dependência do tempo, as operações da velocidade angular e da aceleração angular foram realizadas pelo método de derivação descrita no algoritmo, em código C++, na plataforma IDE do Arduino, conforme o Apêndice A. Para obtenção dos gráficos das grandezas físicas em tempo real, utiliza-se o programa Excel interligado ao Arduino pelo programa PLX-DAQ [10].

3. Resultados experimentais

Os resultados da posição angular θ (rad), da velocidade angular ω (rad/s) e da aceleração angular α (rad/s²), todos com dependência do tempo, são mostrados na Fig. 4. Eles foram obtidos para $n = 12$ voltas, um valor aceitavelmente seguro para o sistema em estudo, visto que a rotação é limitada pelo comprimento do barbante e pelo diâmetro da polia (2 cm). Para efeito de análise, serão apresentadas as equações horárias que descrevem um ponto material em MCUV

$$\theta(t) = \theta_0 + \omega_0 t + \frac{\alpha}{2} t^2, \quad (3)$$

$$\omega(t) = \omega_0 + \alpha t, \quad (4)$$

$$\alpha(t) = \alpha = \text{constante}, \quad (5)$$

onde θ_0 é a posição angular inicial e ω_0 é a velocidade angular inicial do ponto material.

Primeiramente, na Fig. 4(a), são apresentados os dados coletados experimentalmente em forma de gráfico e

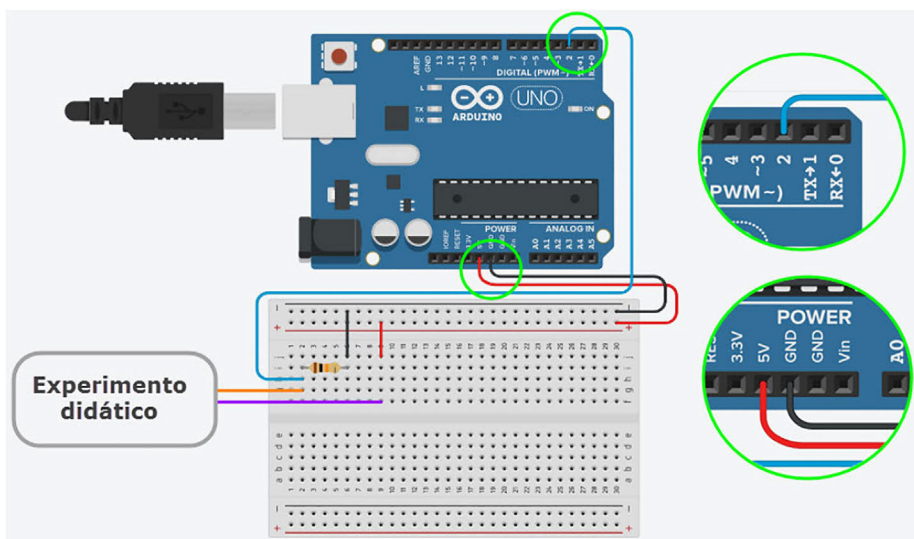


Figura 3 - Circuito esquemático para extração de dados do experimento didático [11]. Os círculos verdes destacam os terminais do Arduino que fazem ligações com a *protoboard* e o resistor de 10 k Ω , e os fios laranja e roxo fazem a conexão entre o experimento e o circuito apresentado.

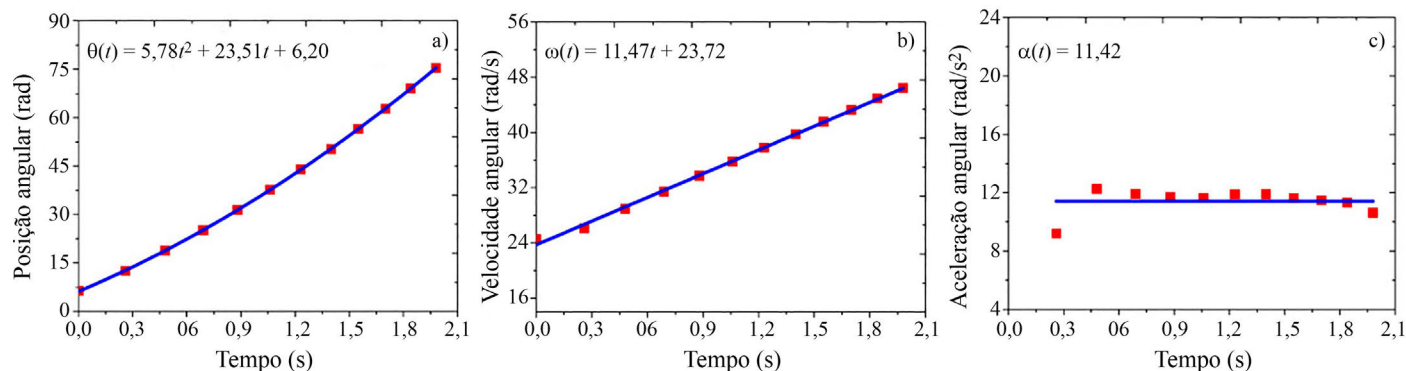


Figura 4 - Resultados das grandezas físicas do MCUV: (a) posição angular; (b) velocidade angular; (c) aceleração angular, ambas em função do tempo, onde os pontos em vermelho são os resultados experimentais e a curva azul representa o ajuste teórico estabelecido pelas respectivas funções horárias.

comparado com ajuste de curvas, com valores dos termos da Eq. (3). Observa-se que, à medida que o tempo passa, a posição aumenta, evidenciando uma função quadrática e crescente com o tempo. Em seguida, na Fig. 4(b), são vistos os pontos experimentais que estão praticamente sobre uma reta crescente com o tempo, mostrando que o ponto material realiza aproximadamente deslocamento angular igual em intervalos de tempo, como é constatado no ajuste das curvas experimentais pelo método dos mínimos quadrados, resultando em uma reta oblíqua em relação aos eixos do tempo. Finalmente, na Fig. 4(c), os dados experimentais para a aceleração angular aparecem em torno de $11,42 \pm 0,24 \text{ rad/s}^2$ em relação ao tempo e, com o ajuste da curva, é fácil ver que a aceleração aproxima de um valor constante no tempo. Embora a aceleração angular da Fig. 4(c), $11,42 \pm 0,24$, apresente um valor diferente do da aceleração angular na equação da Fig. 4(a), $11,56 \pm 0,09$, e da Fig. 4(b), $11,47 \pm 0,17$, essa diferença é justificada pelo aumento do

erro padrão, uma vez que a aceleração é a derivada da velocidade e os erros de medidas se propagam ao longo dos cálculos, podendo ser observados através da dispersão dos pontos no gráfico. Além disso, erros infinitesimais dos dados do tempo de rotação em decorrência de mínimos atritos no eixo de rotação do disco e no mecanismo de contato podem interferir nos cálculos das grandezas físicas do MCUV. Apesar das propagações dos erros, o experimento didático com Arduino apresentou resultados característicos do MCUV, tornando possível a reprodução e sua utilização nas aulas de física no Ensino Médio.

4. Conclusões

Em suma, um experimento produzido com materiais alternativos integrados ao computador por meio do Arduino foi apresentado para o estudo do MCUV, com base nas grandezas físicas: posição angular, velocidade angular e aceleração angular de um ponto material em movimento circular. Os resultados experimentais mostraram concor-

dância com os modelos teóricos bem estabelecidos, ou seja, a posição angular mostrou claramente a relação quadrática com o tempo, a velocidade angular mostrou um perfil de inclinação crescente e a aceleração angular exibiu aproximadamente um comportamento constante. Sendo assim, este experimento pode ser uma alternativa interessante para professores de física no nível de Ensino Médio realizarem atividades práticas, complementando, assim, as aulas teóricas, visto que utiliza materiais alternativos e acessíveis. Além disso, o experimento possibilita uma proximidade entre os conceitos físicos estudados em sala de aula e o cotidiano dos alunos, podendo tornar a aula mais interativa e instigante, no sentido de despertar o interesse, a curiosidade e a motivação deles no processo da aprendizagem em busca do conhecimento dos conceitos de física.

Recebido em: 21 de Maio de 2021

Aceito em: 26 de Abril de 2022

Apêndice A

Código em linguagem C++, na plataforma Arduino, para o cálculo das grandezas físicas do MCUV.

```
// Declaração das variáveis
double instante[20];
double T[20];
double angle = 6.283;
double angularPosition[20];
double angularSpeed[20];
double angularAcceleration[20], DT[20];
long int timerRunning=0;
int button = 2;
int i = 0;
int nptotal = 15;
int np = nptotal+2;
int j;
void setup(){
  Serial.begin(9600);
  pinMode(button,INPUT);
```

```

digitalWrite(button,LOW);
}
void loop(){
if (timerRunning == 0 && digitalRead(button) == HIGH){
timerRunning = 1;
}
if (timerRunning == 1 && digitalRead(button) == HIGH){
T[i] = micros();
if (i == np+3){
for (int j = 0; j < np; j++){
//Tempo
instante[j] = (T[j+3]-T[3])/1000000.0;
// Posição angular
angularPosition[j] = (j+1.0)*angle;
}
// Velocidade angular
angularSpeed[0] = ((angularPosition[1]-angularPosition[0])/(instante[1]-instante[0]));
for (int j = 1; j < np-1; j++){
angularSpeed[j] = 0.5*(((angularPosition[j+1]-angularPosition[j])/(instante[j+1]-instante[j]))+((angularPosition[j]-angularPosition[j-1])/(instante[j]-instante[j-1]))));
}
angularSpeed[np-1] = ((angularPosition[np-1]-angularPosition[np-2])/(instante[np-1]-instante[np-2]));
//Aceleração angular
angularAcceleration[0] = ((angularSpeed[1]-angularSpeed[0])/(instante[1]-instante[0]));
for (int j = 1; j < np-1; j++){
angularAcceleration[j] = 0.5*(((angularSpeed[j+1]-angularSpeed[j])/(instante[j+1]-instante[j]))+((angularSpeed[j]-angularSpeed[j-1])/(instante[j]-instante[j-1]))));
}
angularAcceleration[np-1] = ((angularSpeed[np-1]-angularSpeed[np-2])/(instante[np-1]-instante[np-2]));
Serial.println("CLEARDATA");
Serial.println("LABEL,np,s,rad,rad/s,rad/s^2");
for (int j = 0; j < np-2; j++){
Serial.print("DATA,");
Serial.print(j);
Serial.print(",");
Serial.print(instante[j], 10);
Serial.print(",");
Serial.print(angularPosition[j], 10);
Serial.print(",");
Serial.print(angularSpeed[j], 10);
Serial.print(",");
Serial.println(angularAcceleration[j], 10);
}
}
i++;
while(digitalRead(button) == HIGH){
}
delay(88);
}

```

Referências

- [1] H.D. Young, R.A. Freedman, A.L. Ford, *Física I: Mecânica* (Addison Wesley, São Paulo, 2008).
- [2] E.C. Grasselli, D. Gardelli, in: *Os Desafios da Escola Pública Paranaense na Perspectiva do Professor PDE, 2014*, editado por R. Hasper, D.R. Nascimento, S.M.O. Ludwig (Cadernos PDE, Curitiba-, 2016).
- [3] J.U.P. Moraes, R.S. Silva Jr, Lat. Am. J. Phys. Educ. **9**, 2504-1 (2015).
- [4] M.G. Séré, S.D. Coelho, A.D. Nunes, Caderno Brasileiro de Ensino de Física **20**, 30 (2003).
- [5] <https://www.Arduino.cc/>, acessado em 31/03/2021.
- [6] J.M. Cardoso, M. Zannin, Revista Brasileira de Ensino de Física **41**, e20190028 (2019).
- [7] T.D. Admiral, I.D.S. Cunha, L.P.T. Carmo, Ensino em Foco, **3**, 35 (2020).
- [8] I.V. Sousa Jr, J.O.S. Miranda, A.C.S. Nascimento, F.R.V. Araújo, Revista Brasileira de Ensino de Física **42**, e20200177 (2020).
- [9] L.I.M. Sinimbu, R.G. Sarmiento, N.F. Frazão, M.P. Madeira, Física na Escola **19**(2), 96 (2021).
- [10] <https://www.parallax.com/download/>, acessado em 31/03/2021.
- [11] <https://www.tinkercad.com>, acessado em 10/04/2021.