



## Centrífuga com HD controlada pelo Arduino para explorar física e eletrônica

João Paulo Mannrich<sup>1#</sup> , Othon da Rocha Neves Jr.<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Departamento Regional, Gerência de Educação Básica, Serviço Social da Indústria, Florianópolis, SC, Brasil.

### Palavras-chave

Arduino  
centrífuga  
força centrípeta  
movimento maker  
faça você mesmo

### Resumo

Neste trabalho, apresentamos a construção de uma centrífuga feita com um disco rígido usado. Além de poder ser utilizada em laboratórios de biologia e química, sua construção possui potencial para o ensino de fenômenos de física, eletrônica e programação, bem como para compor um laboratório escolar. O dispositivo pode ser associado ao movimento *biohacker*, vinculado à ideia da ciência de código aberto. Trata-se de uma junção de práticas de biologia e biotecnologia associadas à ética hacker. Seus praticantes defendem a ideia de que todos podem fazer ciência e buscam alternativas de baixo custo para contribuir com a democratização da ciência.

### Introdução

**D**urante décadas, pesquisadores têm apontado a necessidade de melhorar o engajamento dos estudantes nas áreas científicas, que muitas vezes são centradas na resolução de exercícios e em discussões teóricas, com abordagens abstratas e pouco espaço para a produção de significados associados à vida dos estudantes ou conectados a situações reais. Diferentes autores têm proposto abordagens diferenciadas, como, por exemplo, aquelas centradas nos estudantes, com o uso de atividades práticas e/ou experimentais [1–4], ou ainda na utilização de recursos tecnológicos e de prototipagem, como o

Arduino, no ensino [5–8]. Este trabalho contribui com uma proposta que alia atividades práticas situadas em um contexto mais amplo, que envolve desenvolvimento científico e tecnológico, bem como o uso de novas tecnologias e suas relações com disciplinas das ciências da natureza.

A proposta deste artigo pode ser situada dentro de um contexto emergente de democratização da ciência e tecnologia, atrelada a um movimento que ficou conhecido como *biohacker*. Ele pode ser entendido como um desdobramento do movimento *maker*, mas com foco na área da biologia [9–14]. Há diversas comunidades virtuais que promovem

**Pesquisadores têm apontado a necessidade de melhorar o engajamento dos estudantes nas áreas científicas, muitas vezes são centradas na resolução de exercícios e em discussões teóricas com abordagens por demais abstratas**

# Autor de correspondência. E-mail: [jpmannrich@yahoo.com.br](mailto:jpmannrich@yahoo.com.br) | [joao.mannrich@sesisc.org.br](mailto:joao.mannrich@sesisc.org.br)

Este é um artigo de acesso livre sob licença Creative Commons



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>

Copyright © 2024, Copyright by Sociedade Brasileira de Física. Printed in Brazil.

práticas, como o [hackteria.org](http://hackteria.org) *hackteria.org*, onde é possível encontrar, entre outras coisas, projetos para a construção de microscópios, centrífugas, termocicladores, incubadoras e outros equipamentos de laboratório. Apesar de haver tutoriais, eles são bastante incompletos e não têm a intenção de explorar conceitos e/ou práticas que possam ser utilizadas de forma direcionada ao ensino e à aprendizagem de conhecimentos científicos e tecnológicos. Com esta proposta, esperamos contribuir para que práticas de ensino de física e ciências na educação básica possam incorporar outros elementos culturais contemporâneos, como eletrônica e programação, além de fomentar a interdisciplinaridade. Apesar de o projeto apresentado não ser simples para o contexto da educação básica, entendemos que ele pode servir de inspiração para projetos de iniciação científica e tecnológica.

Em outro artigo, propusemos a construção de um microscópio bastante potente, associado ao movimento *biohacker* [15]. Neste trabalho, buscamos complementar a proposta do microscópio com a construção de uma centrífuga feita com um HD (do inglês *Hard Disk* - Disco Rígido). Podemos destacar que o princípio da centrífuga está presente em diversos equipamentos domésticos, como nas máquinas de lavar roupas e em secadores de salada. Também está presente em tecnologias mais avançadas, como na separação do urânio 238 (mais “pesado”) do urânio 235 (mais “leve”) no processo de produção de energia nuclear. Na biologia, o equipamento pode ser usado no processo da Reação em Cadeia da Polimerase (PCR) para separar o DNA de alguma amostra de interesse, que será amplificada em um termociclador e analisada por meio do processo de eletroforese [16]; na química, o equipamento pode ser aplicado em análises químicas do solo [17]. Para cada aplicação, há protocolos específicos que envolvem centrifugar a amostra por um determinado tempo e a uma determinada “força *g*”. Neste artigo, mostramos como construir a centrífuga, determinar a “pseudoforça *g*” para definir velocidades de rotação, bem como programar alguns protocolos de centrifugação. Por fim, apresentamos algumas possibilidades para o ensino de ciências.

## 2. Materiais e montagem

A construção da centrífuga demandará os seguintes materiais: disco rígido usado; Arduino (utilizamos o modelo “nano” por ser menor e mais barato); *Electronic Speed Control* (ESC) utilizado na construção de quadrópetos, módulo de exibição LCD com interface I2C; fonte de 12 V 5 A, e encoder KY-040 (potenciômetro). Além dos itens indicados, serão necessários fios para conexões elétricas, jumpers macho-macho e ferramentas

como chaves e ferro de solda para montagem das partes mecânica e elétrica. Utilizaremos um computador com a interface Arduino IDE para programação. Para determinar a velocidade de rotação do disco rígido, utilizaremos um osciloscópio disponível no software *Theremino*<sup>1</sup>, associado a dois microfones externos ligados ao computador. Com o apoio de uma impressora 3D, construímos um rotor que será parafusado no motor do disco rígido. O rotor impresso foi projetado para acoplar microtubos plásticos de centrifugação de 1,5 mL.

Na Fig. 1 podemos visualizar o esquema de ligação elétrica das partes do protótipo.

Observe que o disco rígido foi completamente desmontado, restando apenas o motor. Os próprios parafusos obtidos no processo de desmontagem foram utilizados para fixar o rotor impresso. Note que as duas imagens da Fig. 2 exibem a parte superior do motor, onde será parafusado o rotor produzido com uma impressora 3D<sup>2</sup>.

## 3. Componentes eletrônicos

O Arduino é uma plataforma de prototipagem eletrônica de código aberto que consiste em hardware e software projetados para facilitar o desenvolvimento de projetos eletrônicos interativos. O projeto Arduino foi criado na Itália por um grupo de desenvolvedores em 2005 e, desde então, tornou-se muito popular na comunidade de *makers*, entusiastas de eletrônica e educadores. O hardware principal do Arduino é uma placa de circuito impresso com um microcontrolador (geralmente baseado na arquitetura Atmel AVR) e uma série de pinos de entrada/saída que permitem a conexão de sensores, atuadores e outros componentes eletrônicos

**Com esta proposta, esperamos contribuir para que práticas de ensino de física e ciências na educação básica possam incorporar outros elementos culturais contemporâneos, como eletrônica e programação, além de fomentar a interdisciplinaridade**

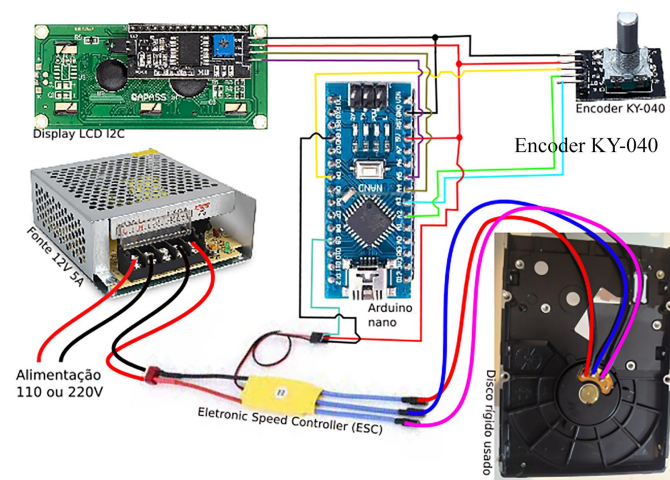


Figura 1 - Esquema de montagem da centrífuga com disco rígido.

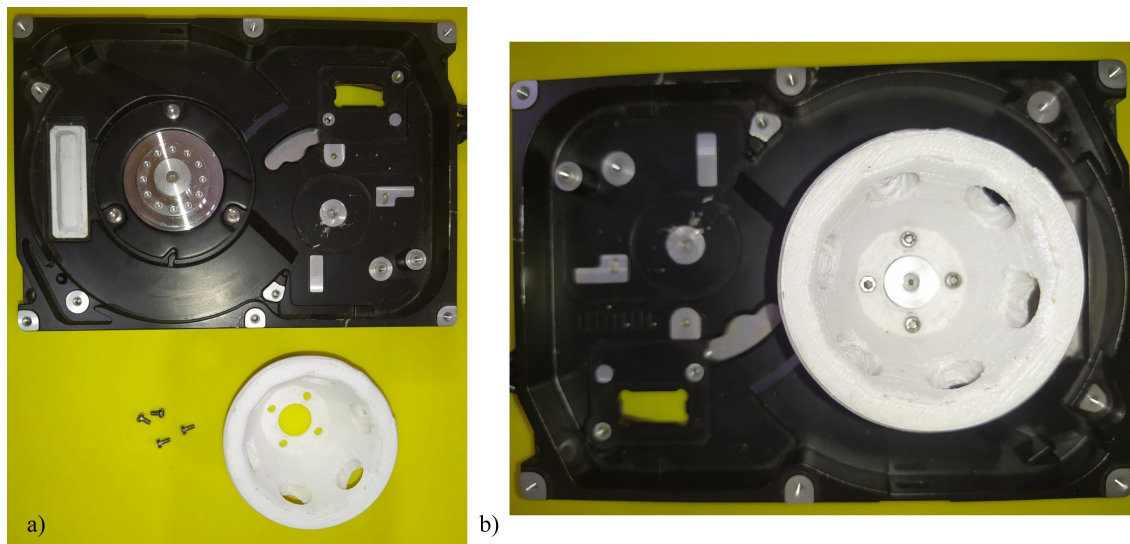


Figura 2 - Detalhe do disco rígido desmontado junto ao rotor produzido na impressora 3D.

[18]. Na Fig. 3, é possível visualizar um diagrama esquemático do Arduino com seus pinos e funções.

O modelo Arduino Nano possui 14 pinos digitais (in/out - I/O), que podem ser configurados no modo PWM (*pulse width modulation*, que significa modulação por largura de pulso). Para funções analógicas, ele possui 9 pinos; para funções de alimentação, 7 pinos, e para SPI, separado da seção I/O, esse modelo disponibiliza 3 pinos. Por fim, ele também possui 3 pinos de reset, totalizando 36 pinos.

Em nosso circuito, precisamos conectar o display LCD com protocolo I2C, que nos permite conectar diversos dispositivos (periféricos) utilizando apenas duas linhas de dados mencionadas anteriormente (SDA e SCL), *Serial Data* e *Serial Clock*. Dessa maneira, devemos utilizar os pinos A4 e A5 do Arduino.

O módulo Encoder Rotativo KY-040 é um componente de medição regular desenvolvido para converter movimentos rotativos (ou lineares) em impulsos elé-

tricos de onda quadrada. Os impulsos elétricos produzidos pelo encoder podem ser interpretados por plataformas microcontroladas, produzindo uma quantidade exata (de 20 pulsos por rotação) em cada volta. O encoder possui rotação contínua e um botão embutido em seu eixo, que pode ser acionado pressionando-se o eixo. A funcionalidade da pinagem é a seguinte: CLK: Pulso do *clock* - possui resistor *pullup* de 10 K com VCC; DT: Pulso de direção - possui resistor *pullup* de 10 K com VCC; SW: Conecta o pino ao GND quando o eixo é pressionado; VCC: positivo da alimentação, e GND: negativo da alimentação.

### 3.1. Motor e controle de velocidade

O disco rígido possui um motor DC sem escovas (do inglês *brushless DC electric motor* - BLDC) que opera comutando a corrente elétrica entre as bobinas do motor. Os BLDCs são conhecidos por sua eficiência, durabilidade e baixa manutenção, sendo amplamente utilizados em uma variedade de aplicações que requerem controle preciso de velocidade e posição [19]. Na Fig. 4, visualizamos duas partes internas do motor: o estator e o rotor. O estator permanece fixo à carcaça do motor e tem a função de conduzir a energia e transformá-la em energia elétrica. O rotor é uma estrutura que gira em torno de seu próprio eixo, produzindo movimento de rotação e energia.

As partes visíveis na parte interna da Fig. 4 são os eletroímãs, enquanto no círculo externo estão os ímãs permanentes. O controlador ativa um dos eletroímãs, fornecendo uma corrente elétrica a um dos pares de bobinas A, B ou C. Isso faz com que o rotor comece a girar à medida que o ímã permanente experimenta repulsão do eletroímã semelhante (setas vermelhas) e tenta se alinhar com um ímã permanente oposto no estator (setas azuis). No entanto, essa rotação inicial

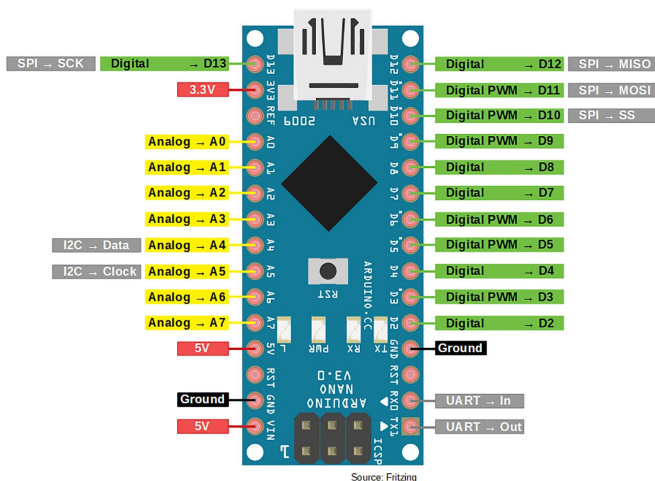


Figura 3 - Pinagem de um Arduino nano. Fonte: Fritzing.org.

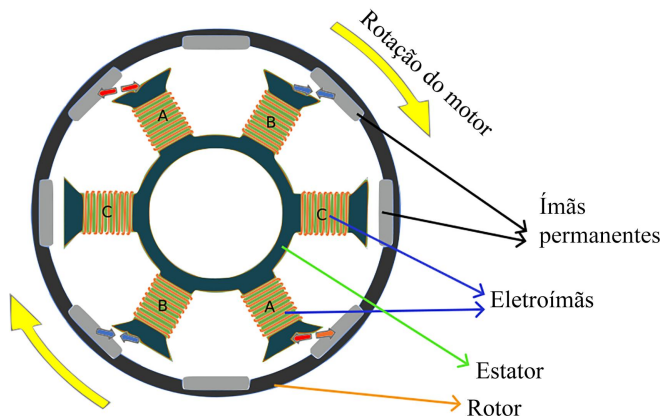


Figura 4 - Desenho esquemático de um BLDC. Fonte: adaptado de <https://www.tytorobotics.com/blogs/articles/how-brushless-motors-work>, acesso em 4 nov. 2023.

Para evitar que a rotação pare, o próximo passo é alimentar outro eletroímã, seguido pelo próximo e assim por diante. Ao fornecer uma corrente trifásica a uma determinada frequência, o motor girará a uma velocidade igual à frequência desse sinal [20].

O Controlador Eletrônico de Velocidade (do inglês *Electronic Speed Controller* - ESC) é necessário para controlar o motor elétrico, fornecendo sinais elétricos que são traduzidos em mudanças na velocidade. Ele usa corrente contínua acoplada a um sistema de comutação para obter uma corrente alternada trifásica. Essa corrente de saída pode ser modificada alterando-se a taxa na qual as chaves abrem e fecham no circuito [21]. Os ESCs sem escovas precisam de informações sobre a posição atual do rotor para poder dar partida no motor e escolher uma direção de rotação. Para determinar sua posição, o ESC utiliza informações do último eletroímã não alimentado para medir sua indução. Essa indução varia dependendo da proximidade do ímã permanente mais próximo. Quanto mais próximo estiver do eletroímã, mais forte será o campo magnético induzido [20].

#### 4. Determinando a velocidade de rotações por minuto, "rpm", e a "pseudoforça g".

Em movimentos circulares, os corpos sofrem uma força chamada centrípeta, expressa como:  $F_C = mv^2/r$  onde  $\omega = v^2/r$ , direcionada para o centro da trajetória do movimento, sendo  $m$  a massa do corpo girante,  $v$  a velocidade linear do corpo e  $r$  o raio do movimento circular em questão. Corpos em movimento circular apresentam uma tendência a serem lançados para fora da trajetória curva, pois tendem a manter seu movimento

**Corpos em movimento circular apresentam uma tendência a serem lançados para fora da trajetória curva, pois tendem a manter seu movimento retilíneo. Essa tendência é erroneamente chamada de "força centrífuga" que, de acordo com as leis da física, não pode ser considerada uma força real**

retilíneo, não fosse a força centrípeta atuando em direção ao centro para mantê-los na curva. Muitas vezes, essa tendência é erroneamente chamada de "força centrífuga" que, de acordo com as leis da física, não pode ser considerada uma força real [22].

Entretanto, em protocolos de centrifugação, o termo "força g" refere-se a um cálculo relativo entre a força centrípeta e a força gravitacional, daí o termo "força g", também chamada de Força Centrífuga Relativa (FCR). Esse cálculo relativo é dado pela razão entre  $F_C$  e  $F_g$  (Eq. 1):

$$\frac{F_C}{F_g} = \frac{mr\omega}{mg}, \quad (1)$$

em que  $m$  é a massa dos corpos em movimento giratório,  $r$  é a medida da distância entre o centro do rotor e a extremidade mais distante do objeto em relação ao centro do rotor,  $\omega$  é a velocidade angular e  $g$ , a aceleração gravitacional. Para a determinação de protocolos de centrifugação, convém reescrever a expressão anterior de modo que a velocidade angular  $\omega$  (representada por  $N$  na expressão) seja em rotações por minuto (rpm) e  $R$  em metros. Portanto, a expressão pode ser apresentada na forma da Eq. (2) [23]:

$$FRC = \frac{F_C}{F_g} = 0,001118 \times R \times N^2. \quad (2)$$

Podemos descobrir a frequência de rotação  $N$  de nossa centrifuga de disco rígido com o auxílio de um osciloscópio (*Digital Audio Analyzer*) rodando no software de código aberto Theremino [24]. O osciloscópio é capaz de sinalizar o intervalo de tempo em que cada um dos dois microtubos passa próximo aos microfones, como pode ser visualizado na Fig. 5.

Cada vez que um tubete passa próximo ao microfone, é produzida uma perturbação na pressão do ar que é detectada pelo microfone. O resultado é apresentado na tela do osciloscópio como um pico no gráfico de tempo, o que pode ser visualizado na Fig. 6. Como é necessário utilizar dois tubetes em posições simetricamente opostas para garantir o balanceamento de massa do movimento, a distância entre dois picos exibidos no osciloscópio representa meia revolução. Portanto, a distância entre três picos representa o tempo de uma revolução completa, ou seja, o período do movimento.

A Tabela 1 apresenta dados produzidos com o auxílio do osciloscópio. A coluna "sinal Arduino" exibe os valores aplicados pelo encoder ao sistema e que foram lidos pelo monitor serial da IDE do Arduino. Variamos

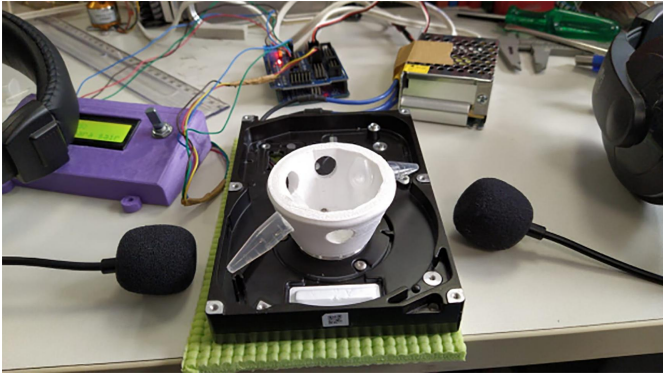


Figura 5 - Arranjo experimental para determinar o tempo de uma revolução da centrífuga feita com o disco rígido.

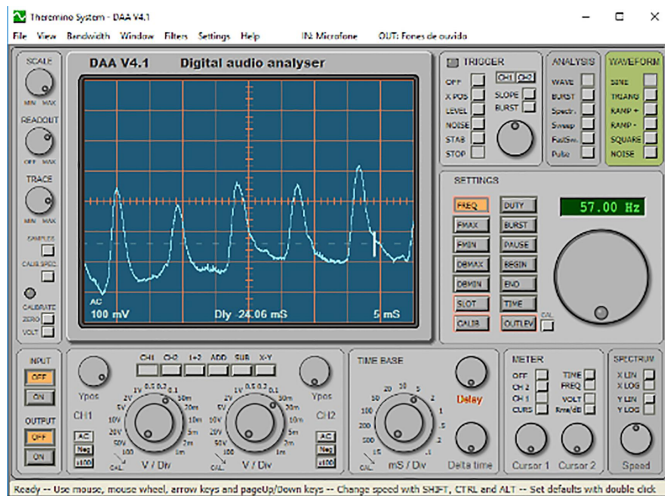


Figura 6 - Interface de visualização do osciloscópio do Theminio.

o sinal de 10 em 10 pontos para obter uma boa resolução nas leituras e identificar as velocidades angulares mínimas e máximas de rotação da centrífuga. A coluna “ms” representa o intervalo em milissegundos de cada leitura do osciloscópio. O exemplo exibido no osciloscópio da Fig. 7 refere-se ao sinal de 110 pontos. A distância entre cada linha vertical do osciloscópio representa 5 ms; portanto, o intervalo entre três picos é aproximadamente 9,2 ms, valor que está exibido na tabela. A frequência em Hz é calculada como o inverso do período dado em ms e convertido para *segundos* na tabela. O número de rotações por minuto (rpm) é determinado multiplicando-se a frequência em Hz por 60 s.

Na Tabela 1 e na Fig. 7, podemos observar que o limite inferior de rotação do sistema fica próximo de 1188 rpm, enquanto o limite máximo está em torno de 7317 rpm. A partir desse ponto, a velocidade de rotação não aumenta mais com o aumento do sinal do Arduino, indicando que chegamos ao limite do sistema, um resultado esperado para muitos modelos de HDs com limite nominal de 7200 rpm.

Tabela 1: Dados medidos e calculados para diferentes sinais aplicados pelo Arduino.

Data audio analyzer - Theminio				
Sinal Arduino	ms Medida	Hz 1/(ms/1000)	rpm Hz × 60	FCR $0,001118 \times R \times N^2$
30	50,5	20	1188	79
40	34	29	1765	174
50	24	42	2500	350
60	18,5	54	3243	589
70	14,9	67	4027	908
80	12,8	78	4688	1230
90	11,4	88	5263	1551
100	10,1	99	5941	1976
110	9,2	109	6522	2382
120	8,4	119	7143	2857
130	8,2	122	7317	2998
140	8,2	122	7317	2998
150	8,2	122	7317	2998

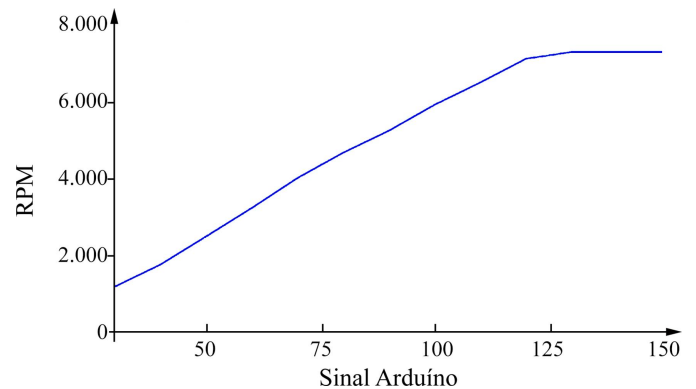


Figura 7 - Sinal do Arduino em função da velocidade de rotação do sistema.

## 5. Programação

Para que o sistema funcione, é necessário programar o Arduino. Fizemos o processo em duas versões. Na primeira, criamos um programa simplificado, tanto para validar o acionamento do encoder e ativar o rotor da centrífuga quanto para realizar as coletas das medidas e determinar a “força g” para diversas velocidades de rotação, resultando na Tabela 1. A segunda versão incluiu a criação de um menu de “protocolos” para que o usuário pudesse customizar o programa, que consiste em 8 arquivos separados para facilitar sua organização. Note que cada arquivo tem uma função específica e é necessário para o funcionamento do código:

- Encoder.cpp, trata da configuração do Rotary Encoder e a detecção de cliques (botão do encoder) usando interrupções por mudança de estado (*Pin Change Interrupts*);
- Encoder.h, complementa a configuração do *Rotary Encoder*, declarações de variáveis globais e funções auxiliares;

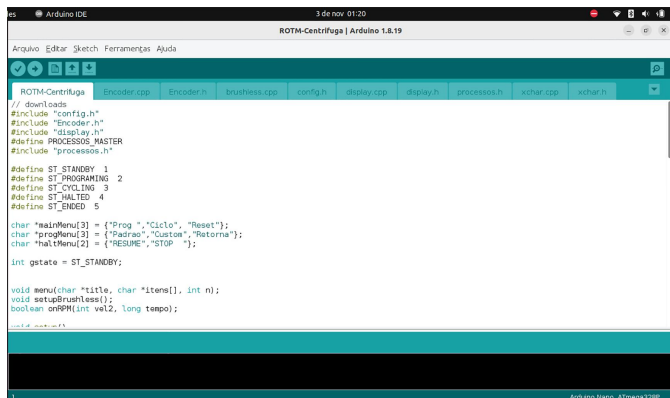


Figura 8 - Tela da IDE do Arduino apresentando a programação final da centrífuga.

- `Brushless.cpp`, controla um motor *brushless* (ESC) usando um servomotor e realiza algumas funções específicas, como variar a velocidade do motor, piscar um LED e testar a rotação por minuto (RPM);
- `config.h`, define os parâmetros-padrão para um ciclo. Estes incluem o número de ciclos (NCICLOS), as velocidades de duas etapas (VEL\_CI e VEL\_CII) e seus respectivos tempos (TEMP\_CI e TEMP\_CII) e a unidade de tempo em milissegundos (UNIDADE\_TEMPO\_MS). Define ainda os pinos do Arduino que serão utilizados para cada elemento (LCD, ESC e *Rodaty Encoder*).
- `display.cpp`, refere-se à manipulação e exibição de informações em um *display* LCD, utilizando as bibliotecas `Wire.h` e `LiquidCrystal_I2C.h`;
- `display.h`, indicam que as variáveis `lcd` (um objeto da classe `LiquidCrystal_I2C`) e `buffer` (um array de caracteres) são declaradas em outro lugar (`display.cpp`);
- `Processos.h`, aglutina os processos que são executados pela centrífuga;
- `ROTM-Centrífuga.ino`, é onde todos os demais arquivos são compilados para o funcionamento dos elementos integrantes da centrífuga. Inclui vários arquivos de cabeçalho (“header files”) que contêm definições de configurações, bibliotecas e processos específicos do projeto definidas em outras abas/arquivos. Inicializa o sistema e executa o loop com as funções definidas.
- O programa permite que o usuário selecione e ative protocolos prontos ou customize seu próprio protocolo. Na customização, o usuário deve escolher ciclos de centrifugação, ajustando parâmetros como tempo e “força *g*” de cada ciclo, além de determinar o número de ciclos que deseja executar.

As opções do menu principal do programa exibido na tela do display envolvem:

- **Prog**: o usuário escolhe essa opção se desejar customizar o protocolo de centrifugação; nela, o usuário escolherá usar programas-padrão ou customizá-los,

determinando números de ciclos de centrifugação, o tempo e a “força *g*” aplicada a cada ciclo;

- **Ciclo**: o usuário escolhe essa opção se deseja executar um ciclo predeterminado ou customizado;
- **Reset**: o usuário escolhe essa opção caso deseje reiniciar sua programação customizada.

A Fig. 9 exibe duas configurações do menu no display: uma com a mensagem de inicialização “Centrifuga BH; Bom dia!” e a outra para execução dos ciclos ou customização com as opções “[Prog] Ciclo Reset”. A Fig. 10 exibe a montagem completa com a centrífuga ligada e pronta para executar um ciclo.

## 6. Conclusão

A construção de artefatos como a centrífuga permite discutir princípios físicos associados a diversos fenômenos científicos e tecnológicos, além de buscar correlações e aplicações em outras áreas, como biologia e química. Permite ainda a abordagem de conheci-

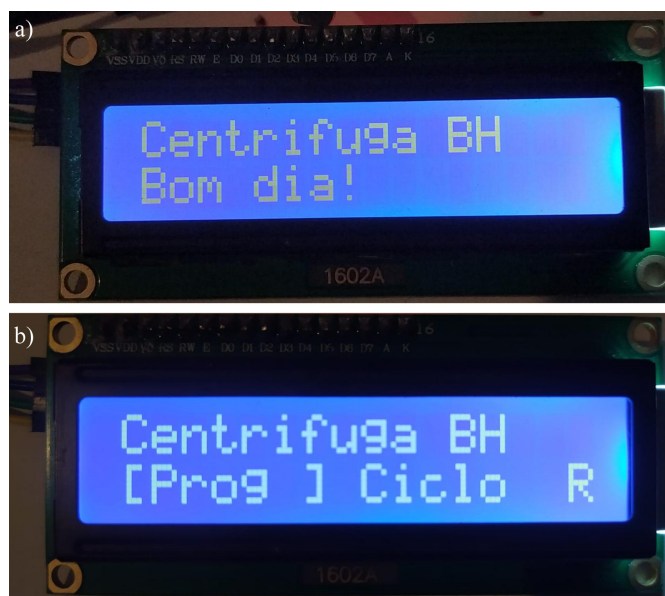


Figura 9 - Visores LCD da centrífuga com HD exibindo a mensagem de inicialização à esquerda e o menu de programação à direita.



Figura 10 - Montagem completa da centrífuga com HD.

mentos de maneira aplicada, com o potencial de tornar o ensino menos abstrato e mais conectado com o mundo real. Além disso, a construção de equipamentos científicos associados a movimentos que promovem a democratização do fazer científico e tecnológico estimula a discussão sobre o próprio processo de construção da ciência, o que pode favorecer a tomada de consciência sobre a natureza da área.

O processo de construção da centrífuga com HD controlada por Arduino não é simples, uma vez que envolve elementos e conceitos mecânicos, elétricos, eletrônicos e de programação. Ao mesmo tempo, é importante conscientizar os estudantes de que as invenções são fruto do trabalho de diversas pessoas ao longo do tempo. Assim, a busca por informações científicas e

técnicas em fontes confiáveis (como livros, sites, revistas e blogs) faz parte da vida em sociedade. No que diz respeito à programação, é comum que profissionais da área utilizem códigos, bibliotecas e fóruns virtuais como fontes para buscar informações necessárias para seus projetos. Apesar da complexidade do projeto, entendemos que, com o código fornecido, é possível replicá-lo e customizá-lo de modo a obter uma centrífuga funcional, tanto para aprender sobre ciência e tecnologia quanto para aplicar os dispositivos em análises e experimentos que demandam o fenômeno da centrifugação.

Recebido em: 17 de Novembro de 2023

Aceito em: 18 de Julho de 2024

### Notas

<sup>1</sup><https://www.theremino.com/pt/>.

<sup>2</sup>Você pode fazer o download do arquivo de impressão pelo vínculo <https://www.thingiverse.com/thing:4677826/files>.

<sup>3</sup>Acesse a página indicada para baixar a versão final comentada do programa: <https://sites.google.com/view/cienciacidade/centr%C3%ADfuga-com-hd>.

### Referências

- [1] M.S.T. Araújo, M.L.V.S. Abib, Revista Brasileira de Ensino de Física **25**, 176 (2003).
- [2] A.T. Borges, Caderno Brasileiro de Ensino de Física **19**, 291 (2002).
- [3] C.V. Pedrosa, in: *Atas do Congresso Nacional de Educação - EDUCERE e Encontro Sul Brasileiro de Psicopedagogia*, Curitiba, 2009.
- [4] M. Resnick, R. Berg, M. Eisenberg, Journal of the Learning Sciences **9**, 7 (2000). doi
- [5] E. Lima Horst, A. Zanki Cordenonsi, Revista Novas Tecnologias na Educação **18**, 470 (2021). doi
- [6] T.D. Admiral, G.R. Fonseca, K.G. Silva, A Física na Escola **19**(1), 63 (2021).
- [7] P.J.S. Santos, J.S. Vargas, Revista Novas Tecnologias na Educação, **20**, 176 (2023). doi
- [8] J. P. Mannrich, O.R. Neves Jr., Revista Novas Tecnologias na Educação **19**, 323 (2021). doi <https://doi.org/10.22456/1679-1916.121355>
- [9] A. Delfanti, *Biohackers: The Politics of Open Science* (Pluto Press, London, 2013). doi
- [10] T. Landrain, M. Meyer, A.M. Perez, R. Sussan, Systems and Synthetic Biology **7**, 115 (2013). doi
- [11] A.H. Abdo, Liinc Em Revista **10**, 460 (2014). doi
- [12] R. Bolton, R. Thomas, Innovations **9**, 213 (2014). doi
- [13] H. Ledford, Nature **467**, 650 (2010). doi
- [14] A. Delgado, B. Callen, Public Underst. Sci. **26**, 179 (2016). doi
- [15] J.P. Mannrich, A Física na Escola **20**(1), 210204 (2022).
- [16] M.R. Costa, E.F. Moura, *Manual de Extração de DNA* (Embrapa Amazônia Oriental, Belém, 2001).
- [17] P.C. Teixeira, G.K. Donagemma, A. Fontana, W.G. Teixeira. *Manual de Métodos de Análise de Solos* (Embrapa, Rio de Janeiro, 2017), 3ª ed.
- [18] S. Monk, *Programação com Arduino: Começando com Sketches* (Bookman, Porto Alegre, 2013).
- [19] J.F. Gieras, *Permanent Magnet Motor Technology: Design and Applications* (CRC Press, Boca Raton, 2009), 3ª ed.
- [20] E. Joner, *Blog da Tyto Robotics* (2022). Disponível em <https://www.tytorobotics.com/blogs/articles/how-brushless-motors-work> acesso em 4/11/2023
- [21] S. Martins, *Blog da Eletrogate* (2020). Disponível em <https://blog.eletrogate.com/esc-caracteristicas-e-funcionamento/>, acesso em 4 nov. de 2023.
- [22] F.W. Sears, M.W. Zemansky, H.D. Young, & R.A. Freedman, *Física: Mecânica* (Pearson Addison Wesley, São Paulo, 2008), 12ª ed., v. 1.
- [23] M. A. Shirai, *Centrifugação* (2020). Disponível em [http://paginapessoal.utfpr.edu.br/marianneshirai/operacoes-unitarias-na-industria-de-alimentos/3%20-%20Centrifugacao.pdf/at\\_download/file](http://paginapessoal.utfpr.edu.br/marianneshirai/operacoes-unitarias-na-industria-de-alimentos/3%20-%20Centrifugacao.pdf/at_download/file) acesso em 4/11/2023.
- [24] The Digital Audio Analyzer. *Theremino System - DAA Help., versão 3* (2018). Disponível em [https://www.theremino.com/wp-content/uploads/files/DaaHelp\\_ENG.pdf](https://www.theremino.com/wp-content/uploads/files/DaaHelp_ENG.pdf), acesso em 4/11/2023.