

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
INSTITUTO DE FÍSICA  
GRADUAÇÃO EM BACHARELADO EM FÍSICA MÉDICA

FELIPE BERALDO DA CRUZ

**CONSTRUÇÃO DE UM GEIGER-MÜLLER A PARTIR DA PLATAFORMA  
ARDUINO**

UBERLÂNDIA

2024

FELIPE BERALDO DA CRUZ

**CONSTRUÇÃO DE UM GEIGER-MÜLLER A PARTIR DA PLATAFORMA  
ARDUINO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Bacharelado em Física Médica do Instituto de Física da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Física Médica.

Orientador: Prof. Dr. Lucio Pereira Neves

Coorientador: Me. Válter José Coutinho Júnior

UBERLÂNDIA

2024

FELIPE BERALDO DA CRUZ

**CONSTRUÇÃO DE UM GEIGER-MÜLLER A PARTIR DA PLATAFORMA  
ARDUINO**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Bacharel em Física Médica e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Bacharelado em Física Médica.

Uberlândia, 24 de abril de 2024.

**Banca Examinadora:**

---

Prof Dr. Lucio Pereira Neves

---

Prof Dr. Mauricio Foschini

---

Prof. Me. Lucas Wilian Gonçalves de Souza

Ao meu avô Manoel Felipe (*in memoriam*).

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, em especial, à minha mãe, Marcela Felipe, por todo o suporte, incentivo e presença integral nestes anos de graduação.

Ao meu primo, Lucas Machado, pelo prazer de poder compartilhar nossas conquistas e frustrações ao longo de nossa jornada universitária.

Ao meu orientador e amigo, Prof. Dr. Lucio Pereira Neves, juntamente da Prof. Dra. Ana Paula Perini e do Ms. Válter José Coutinho Júnior, por todos os conselhos, pela dedicação e a oportunidade de inserção no meio científico-acadêmico, através de minhas iniciações científicas e trabalhos desenvolvidos nos âmbitos do Laboratório de Instrumentação e Dosimetria (LInDa) e no Laboratório de Ensino em Biofísica e Instrumentação (LEBI).

Aos amigos que me acompanharam nos últimos anos desta caminhada. Em especial, aos meus colegas de turma Alessa Maschio, Enzo Della Líbera Vieira e Luis Eduardo Ferreira Jorge, pela companhia e companheirismo em todos os anos de graduação. Agradeço à oportunidade de tê-los como amigos.

Aos meus colegas da 11ª turma da Física Médica, em seus diferentes graus de proximidade, pelo companheirismo e momentos que dividimos nos primeiros anos da graduação.

A todos os professores e membros do Instituto de Física da Universidade Federal de Uberlândia, que de alguma forma colaboraram, direta ou indiretamente, em minha formação e no desenvolvimento deste trabalho.

À Universidade Federal de Uberlândia, pela oportunidade, por toda a estrutura e apoio fornecido.

Este trabalho foi realizado com o apoio financeiro da UFU por meio da bolsa de iniciação científica tecnológica 3999459/2023-3 (F.B.C.) e pelas agências de fomento Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) por meio das bolsas de Produtividade em Pesquisa 312124/2021-0 (A.P.P.) e 312160/2023-2 (L.P.N.), pelo Projeto UNIVERSAL 407493/2021-2; e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), por meio dos projetos APQ-04215-22, APQ-01254-23 e APQ-04348-23. Este trabalho é parte do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Instrumentação Nuclear e Aplicações na Indústria e Saúde (INAIS) 406303/2022-3.

## RESUMO

Detectores de radiação são equipamentos capazes de detectar radiações ionizantes. Um dos métodos de detecção se dá pela utilização de um contador Geiger-Müller, que indica a presença de radiação por meio de pulsos. Neste trabalho, um contador Geiger-Müller foi desenvolvido e implementado à plataforma arduino, para armazenar as contagens. Em experimentos realizados, foi possível obter valores  $500 \mu\text{s}$  para o tempo morto do contador,  $27,53 \pm 5,67$  cpm para níveis de radiação de fundo e  $238,30 \pm 16,84$  cpm para uma fonte de amerício-241 *Phywe*, com diferença relativa de 12,61% de um contador Geiger-Müller *Phywe*.

Palavras-chave: Radiações ionizantes; Detectores de radiação; Geiger-Müller; Arduino.

## **ABSTRACT**

Radiation detectors are equipment capable of detecting ionizing radiation. One of the methods for detecting is through the use of a Geiger-Müller counter, which indicates the presence of radiation through pulses. In this work, a Geiger-Müller counter was developed and implemented on the Arduino platform to store the counts. In experiments, it was possible to obtain 500  $\mu$ s for Geiger-Müller counter dead time,  $27.53 \pm 5.67$  cpm for background radiation level values and  $238.30 \pm 16.84$  cpm for an americium-241 Phywe source, with a relative difference of 12.61% of a Geiger-Müller Phywe counter.

Key-words: Ionizing Radiations; Radiation detectors; Geiger-Müller; Arduino.

# SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	9
1.1. OBJETIVOS.....	10
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	10
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
2.1. DECAIMENTO RADIOATIVO DE RADIOISÓTOPOS.....	11
2.2. INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO COM A MATÉRIA.....	11
2.3. DETECTORES DE RADIAÇÃO.....	12
2.5. O CONTADOR GEIGER-MÜLLER.....	12
2.6. A PLATAFORMA ARDUINO.....	13
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	15
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	23
5. CONCLUSÕES.....	34
ANEXO I: COMPONENTES DO CIRCUITO GEIGER.....	37

## Lista de Figuras

Figura 1: Região de sensibilidade do contador Geiger (Reproduzido de Okuno, 2010).....	13
Figura 2: Circuito da placa do contador geiger. Fonte: disponibilizado pelo fornecedor.....	16
Figura 3: Conexão do arduino com o OLED 0,96". Fonte: Guide for I2C OLED Display with Arduino (2016).....	17
Figura 4: Conexão do geiger com o arduino. Fonte: Arduino DIY Geiger Counter (Murchison, 2019).....	18
Figura 5: Primeiro bloco do código implementado ao arduino. Fonte: O Autor (2024).....	18
Figura 6: Segundo bloco. Função chamada pela linha 13 do código. Fonte: O Autor (2024)..	19
Figura 7: Bloco três de repetição do código. Fonte: O Autor (2024).....	19
Figura 8: Quarto bloco do código implementado ao arduino. Fonte: O Autor (2024).....	20
Figura 9: Fontes de Amerício-241 utilizadas nos experimentos deste trabalho. Fonte: O Autor (2024).....	21
Figura 10: Experimento contagens por minuto em função da distância fonte-tubo. Fonte: O Autor (2024).....	22
Figura 11: Placa do circuito com todos os componentes soldados, onde é possível observar o encaixe para o tubo Geiger-Müller. Fonte: O Autor (2024).....	23
Figura 12: Teste realizado com osciloscópio. Fonte: O Autor (2024).....	23
Figura 13: Captura de tela de um osciloscópio conectado ao Geiger-Müller. Fonte: O Autor (2024).....	24
Figura 14: Primeiro teste de conexão do Geiger-Müller. Fonte: O Autor (2024).....	25
Figura 15: Geiger-Müller montado com um arduino UNO. Fonte: O Autor (2024).....	26
Figura 16: Projeto da caixa do Geiger-Müller. Fonte: O Autor (2024).....	27
Figura 17: Caixa do Geiger-Müller impressa, já com o projeto dentro. Fonte: O Autor (2024). .....	28
Figura 18: Geiger-Müller em funcionamento. O visor mostra 48 contagens por minuto, referente à radiação de fundo. Fonte: O Autor (2024).....	28
Figura 19: Gráfico de contagens por minuto da radiação de fundo. Fonte: O Autor (2024)...	29
Figura 20: Histograma das contagens por minuto de radiação de fundo. Fonte: O Autor (2024).....	30
Figura 21: Gráfico das contagens por minuto de uma fonte de amerício-241. Fonte: O Autor (2024).....	31

Figura 22: Histograma de contagens de uma fonte de amerício-241. Fonte: O Autor (2024)..	32
Figura 23: Gráfico contagens por minuto em função da distância fonte-tubo. Fonte: O Autor (2024).....	33

## **Lista de Tabelas**

Tabela 1: Especificações do tubo J305. Fonte: Geiger-Muller tubes: Comparaison of SBM20, J305 and LND712.....	15
Tabela A.1: Lista de componentes do kit Geiger-Müller. Fonte: Disponibilizado pelo fornecedor.....	37

## 1. INTRODUÇÃO

O Geiger-Müller, ou contador GM, é um detector de radiação desenvolvido por Hans Geiger em 1908 como contador apenas de partículas alfa (Geiger e Rutherford, 1908). A primeira versão do contador era composta apenas por um tubo de descarga, parcialmente no vácuo, e um eletrodo central (Shampo *et al.*, 2011). Assim, qualquer partícula alfa que interagisse com o volume sensível do tubo iria desencadear uma avalanche de elétrons, resultando em uma contagem (Ribeiro, 2014). O contador desenvolvido por Geiger foi o responsável pela descoberta do Efeito Compton, em 1924 (Shampo *et al.*, 2011), e pelo modelo atômico de Rutherford (Geiger e Nuttall, 1911). Em 1928, Walther Müller, aluno de doutorado de Hans Geiger, aprimorou o equipamento e permitiu que ele medisse também partículas beta e fótons.

O equipamento possui um circuito simples, é composto por um amplificador operacional, um tubo Geiger-Müller e um registrador de sinal. Pela simplicidade de operação, o contador Geiger-Müller é amplamente utilizado em dosimetria e proteção radiológica (Castro e Garcia, 2018). O equipamento é capaz de indicar a presença de radiação por meio da contagem de eventos de ionização que ocorrem no volume sensível do tubo Geiger-Müller (Ribeiro, 2014), que geralmente é preenchido por um gás nobre, como o argônio.

Apesar do elevado custo do equipamento, é possível desenvolver o medidor Geiger-Müller utilizando a plataforma Arduino®, junto de um tubo Geiger-Müller, de forma que o projeto se torne viável e ainda eficiente na medição da radiação em diferentes situações. Um Arduino® é uma plataforma de prototipagem eletrônica que possui a integração de códigos de programação na linguagem C/C++ (Arduino, 2020), de código aberto e *hardware* livre. A plataforma possui um *software* gratuito com ambiente gráfico escrito em *Java*. Para extrair os dados obtidos por um Arduino é necessário apenas um cabo USB de conexão.

Um kit Geiger-Müller pode ser encontrado à venda em diversos sites de vendas internacionais, como o *Aliexpress* e *eBay*. O kit em questão é composto por uma placa de circuito, dezenas de componentes eletrônicos para soldagem na placa, e um tubo Geiger-Müller. Assim, o kit Geiger-Müller pode ser implementado à plataforma Arduino®, de forma

que suas contagens possam ser visualizadas em um visor e registradas por um computador, através do *software Arduino IDE*, sem que o projeto tenha um alto custo de execução.

### 1.1. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é contruir um contador Geiger-Müller a partir da plataforma Arduino®, utilizando componentes de baixo custo e testá-lo com fontes radioativas didáticas *Phywe* disponíveis no Laboratório de Ensino em Física das Radiações Ionizantes da Universidade Federal de Uberlândia (*PHYWE Radioactive source Am-241, 74 kBq – 09047-51*).

### 1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Adquirir o kit Geiger-Müller, um Arduino® e um visor para visualização das contagens, bem como cabos *jumpers* para a conexão de cada dispositivo e uma fonte de alimentação;
- Soldar os componentes do circuito da placa Geiger-Müller;
- Desenvolver um código de programação em linguagem C/C++ para implementação no *software Arduino IDE*;
- Realizar as conexões de todos os equipamentos utilizando os fios *jumpers*;
- Executar testes de funcionamento;
- Realizar experimentos de níveis de radiação de fundo e com fontes artificiais de amerício-241 disponíveis no Laboratório de Ensino em Física das Radiações Ionizantes da Universidade Federal de Uberlândia;
- Avaliar os resultados e comparar com um contador Geiger-Müller comercial, para fins didáticos, disponível no Laboratório de Ensino em Física das Radiações Ionizantes da Universidade Federal de Uberlândia;
- Modelar uma caixa para comportar o projeto final e imprimir em uma impressora 3D.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. DECAIMENTO RADIOATIVO DE RADIOISÓTOPOS

Radioisótopos são núclídeos instáveis de seus elementos que emitem radiação na forma de partículas alfa, partículas beta ou fótons gama, em diferentes energias. Cada radionuclídeo tem seu respectivo tempo de meia-vida, que é o tempo necessário para que metade da massa de uma amostra radioativa decaia (Attix, 1986).

O decaimento por partículas alfa tende a ocorrer com núcleos pesados. O decaimento beta menos ocorre para núcleos com excesso de nêutrons, enquanto núcleos com excesso de prótons tendem a decair por beta mais ou captura eletrônica (Okuno, 2010). A captura eletrônica ocorre caso a diferença de massa entre os núcleos seja menor que  $1,022 \text{ MeV}$  (Attix, 1986).

### 2.2. INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO COM A MATÉRIA

Quando a radiação possui energia suficiente para ionizar um átomo, ela pode interagir com esse átomo de diferentes maneiras, a depender do tipo de radiação, do valor de sua energia e o material com qual esta interage (Okuno, 2010). A seção de choque de cada interação define a probabilidade de o efeito ocorrer em função das características do meio e energia da radiação.

Os tipos de radiação ionizante a serem consideradas nas interações são: raios gama, raios X, elétrons e núcleos pesados (nêutrons, prótons, partículas alfa, píons, dentre outros).

Essas se dividem em radiações diretamente e indiretamente ionizantes.

Radiações diretamente ionizantes são partículas carregadas rápidas que depositam sua energia diretamente na matéria, através de interações coulombianas ao longo de seu caminho, enquanto radiações indiretamente ionizantes são fótons ou nêutrons, que precisam primeiramente transferir sua energia às partículas carregadas no meio para que possam interagir na matéria (Attix, 1986).

Existem diversas formas de interação da radiação com a matéria, com grande importância para a Física Médica, como efeito fotoelétrico, efeito Compton e produção de pares. O efeito fotoelétrico é definido pela absorção total da energia de um fóton por um átomo, que então libera um elétron, enquanto o efeito Compton é definido pela absorção

parcial da energia do fóton, que é espalhado, junto de um elétron (Knoll, 2010; Attix, 1986). O leitor é convidado a uma maior discussão nas referências Attix (1986), Okuno (2010), Knoll (2010), Martin (2013) e Tauhata *et al.* (2014).

### 2.3. DETECTORES DE RADIAÇÃO

O uso da radiação é bastante presente na medicina nos dias atuais, e quando se trata de proteção radiológica, o uso de dosímetros e detectores de radiação se torna fundamental para proteção e controle de qualidade (Bravim, 2015). Esses dispositivos são capazes de indicar a presença de radiação no ambiente por meio de diversos processos, a depender do tipo de radiação e do material utilizado na construção do equipamento.

Detectores de radiação são constituídos de um volume sensível, composto por um elemento ou material sensível à radiação ionizante, e um mecanismo que interpreta os efeitos da ionização no volume sensível e transforma em valores visíveis, relacionados a alguma grandeza de medição de radiação. Há três modos diferentes de operação dos detectores de radiação: por pulsos, corrente ou pela média quadrática da tensão (*MSV*) (Knoll, 2010).

Câmaras de ionização são detectores de radiação que apresentam um volume interno preenchido por um gás contido em paredes de espessura igual ao alcance máximo dos elétrons do material da parede, para que estes não alcancem a cavidade (Albuquerque, 1989), de forma que não interfiram na medição da grandeza radiológica. Internamente, a câmara de ionização possui um eletrodo, a fim de se medir a corrente gerada pela ionização do gás.

Quando a radiação ionizante passa pelo gás do interior da câmara de ionização as interações da radiação com a matéria podem ser interpretadas como sinais elétricos a partir da formação de pares de íons (Knoll, 2010).

### 2.5. O CONTADOR GEIGER-MÜLLER

O contador Geiger-Müller é um instrumento que mede radiações ionizantes e opera no modo pulso (Knoll, 2010). Criado em 1908, o medidor recebeu este nome em homenagem ao seu criador, o físico alemão Johannes Hans Geiger, ajudante de Rutherford, e do também físico alemão Walther Müller, aluno de Hans Geiger. O equipamento é composto por um tubo preenchido por um gás nobre e um circuito amplificador (Kakuno, 2014).

A detecção de radiação acontece a partir da ionização do gás presente no interior do tubo. A tensão aplicada no eletrodo gera um forte campo elétrico, fazendo com que os elétrons livres provenientes das ionizações das moléculas adquiram energia cinética suficiente para gerar, em colisões, elétrons livres dos átomos em seus arredores, gerando uma avalanche de elétrons no interior do tubo. Com o campo elétrico, todos os elétrons da avalanche migram para o eletrodo. O equipamento então detecta um pulso de corrente, que passa por um amplificador para que se faça a contagem de pulsos por segundo, ou pulsos por minuto. Cada pulso pode ser interpretado como uma partícula emitida (Tauhata *et al.*, 2014). Durante a avalanche de elétrons, outras partículas que entram no tubo não são contabilizadas, havendo apenas a interpretação de um único pulso. Assim, diz-se que o tempo que o tubo está em avalanche o torna inoperante, sendo definido este momento como o tempo-morto (Attix, 1986). O tempo-morto depende de diversas características do tubo, como a tensão de operação, o gás no interior do tubo, dentre outras. A figura 1 mostra um esquema do Geiger-Müller.

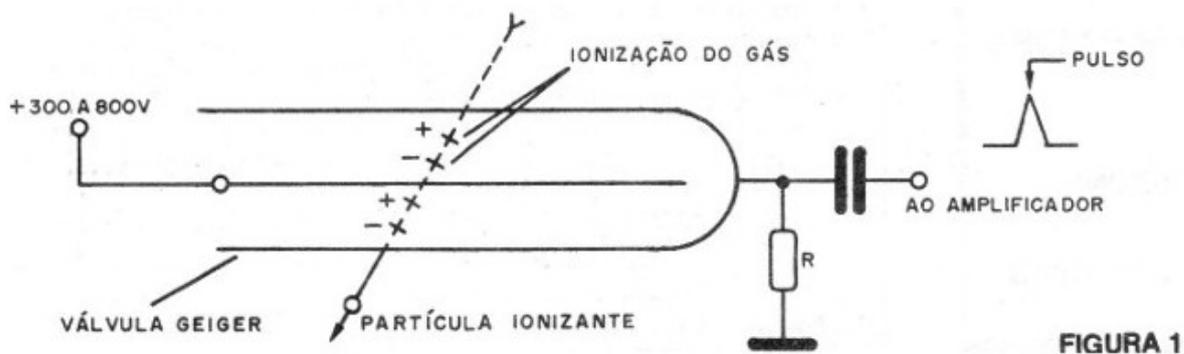


Figura 1: Esquema de um contador Geiger-Müller. Fonte: Instituto NCB (s.d.)

O equipamento é amplamente utilizado na dosimetria de radiação, proteção radiológica, física experimental e indústria nuclear (Connor, 2019) e uma vantagem técnica do contador Geiger-Müller é a simplicidade de sua construção e portabilidade. Porém, o dispositivo não consegue identificar a natureza da ionização em seu interior, uma vez que o pulso de saída é independente da energia da radiação incidente (Tauhata *et al.*, 2014), e apresenta um tempo-morto alto. (Attix, 1986). A figura 2 mostra um gráfico da região de operação dos detectores à gás. Uma câmara de ionização, por exemplo, opera na região de

tensão II, de saturação iônica. O contador Geiger-Müller se encontra em uma região de altas tensões (IV). A curva representa a sensibilidade à diferentes tipos de partículas. Para o contador Geiger-Müller, não há diferenciação do tipo de partícula.

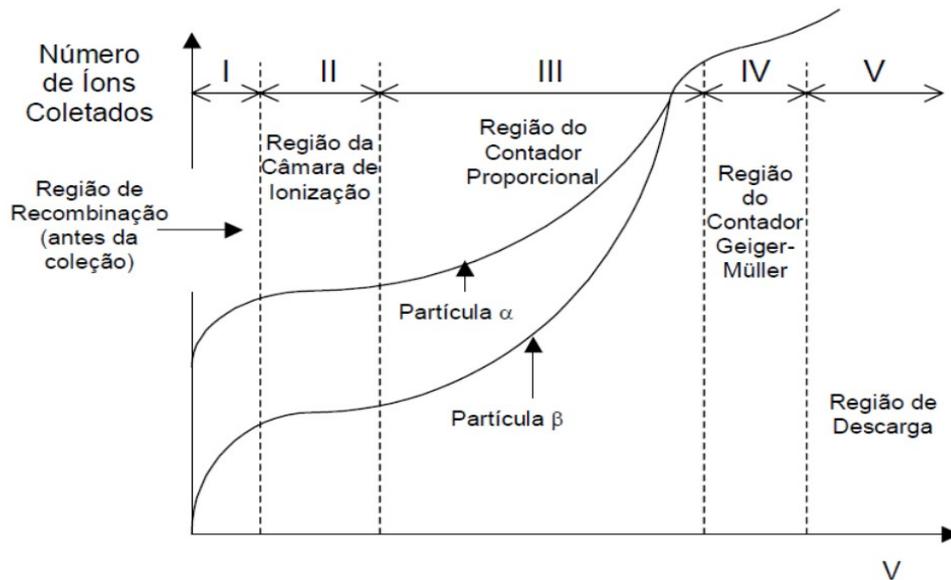


Figura 2: Região de sensibilidade do contador Geiger (Reproduzido de Okuno, 2010)

## 2.6. A PLATAFORMA ARDUINO

O Arduino® é uma plataforma de prototipagem eletrônica de código aberto que utiliza uma linguagem de programação simples, derivada da C/C++. Este pode ser incorporado a um circuito, de forma a automatizar tarefas, controlar sensores e fazer tratamento de dados (Cavalcante *et al.*, 2011).

Um arduino padrão possui um microcontrolador *ATmega* com um cristal oscilador controlador do *clock* do processador (frequência em que o processador executa suas tarefas), um módulo de comunicação com um computador, entrada para alimentação e portas de leitura e escrita.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a construção do Geiger-Müller, o kit Geiger-Müller foi adquirido em um site de vendas *on-line*, contendo um tubo Geiger-Müller, uma placa de circuito e os componentes (disponível em: <https://pt.aliexpress.com//i/32822477320.html>). O tubo J305 foi utilizado para a realização deste trabalho. As especificações do tubo se encontram na Tabela 1.

Tabela 1: Especificações do tubo J305. Fonte: Geiger-Muller tubes: Comparaison of SBM20, J305 and LND712.

Componente	Especificação
Tubo	J305
Dimensões	10 x 107 mm <sup>2</sup>
Densidade da parede	50 ± 10 cg/cm <sup>2</sup>
Fonte de calibração	<sup>60</sup> Co
Tensão de operação do tubo	380 – 450 V

O circuito utilizado para a construção do contador é do modelo *RadiationD-v1.1(caJOE)* e foi adquirido junto com o tubo. Os componentes que compõem o kit Geiger-Müller estão discriminados no Anexo I. O esquema do circuito da placa se encontra na figura 3. O circuito da placa do contador é dividido em três partes: a primeira para amplificar a tensão do circuito, a segunda para captação do sinal e a última para registro. O circuito conta com um buzzer para aviso sonoro e dois *leds* luminosos (um para indicar que o circuito está ligado e outro para indicar a presença de um pulso).

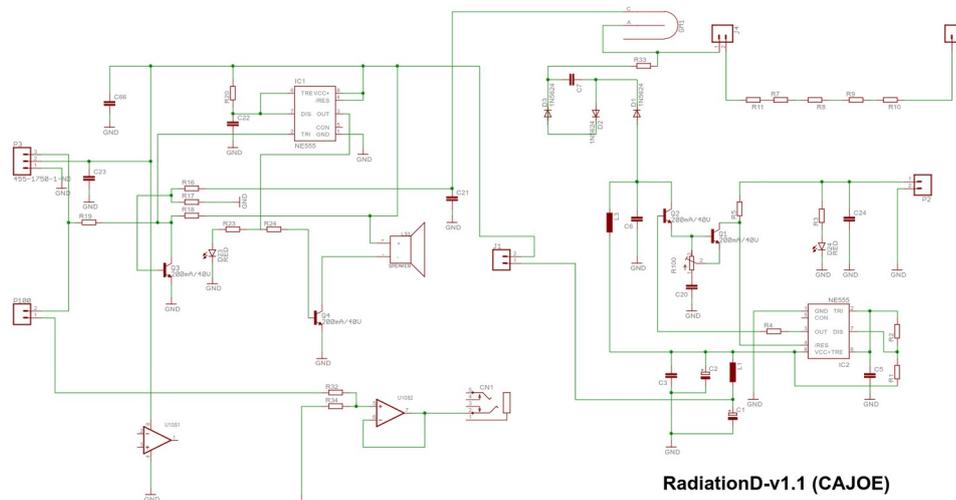


Figura 3: Circuito da placa do contador geiger. Fonte: disponibilizado pelo fornecedor.

Para a soldagem dos equipamentos foi utilizado estanho. Todo o processo foi realizado no Laboratório de Instrumentação e Dosimetria (LinDa) da Universidade Federal de Uberlândia.

Um conjunto de três pilhas AA de 1,5V de tensão cada foi utilizado como fonte de alimentação do circuito, totalizando uma alimentação de 4,5V.

Para tratamento dos dados, a plataforma Arduino® foi incorporada ao projeto. O arduino é uma ferramenta de prototipagem eletrônica de *hardware* livre. A linguagem utilizada na programação do Arduino® é baseada em C/C++.

Um LCD de 16 colunas e 2 linhas (LCD 16x2) foi incorporado ao projeto nos primeiros testes, mas foi substituído por um OLED de 0,96" (tamanho de visor), pelo tamanho reduzido e facilidade nas conexões. A figura 4 mostra como foram feitas as conexões do Arduino® com o visor OLED.

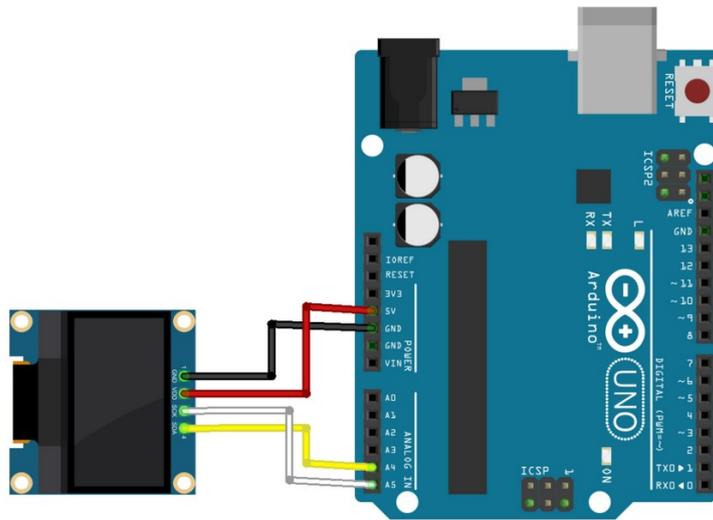


Figura 4: Conexão do arduino com o OLED 0,96". Fonte: *Guide for I2C OLED Display with Arduino (2016)*.

O Arduino® utilizado foi do modelo UNO. Esse modelo foi escolhido devido à facilidade com as conexões dos *jumpers*, uma vez que um Arduino® do modelo nano ou micro deve ser incorporado a um *shield* ou a uma placa de ensaios para que as conexões sejam feitas.

A figura 5 demonstra as conexões da placa do circuito do Geiger-Müller com o Arduino® UNO. É possível ver que o Geiger-Müller é conectado ao Arduino® UNO por meio da porta P3. O pino P3.1 é referente ao GND (terra), o P3.2 é a entrada de alimentação de tensão 5V, enquanto o P3.3 transporta as informações do pulso captado pelo tubo Geiger-Müller.

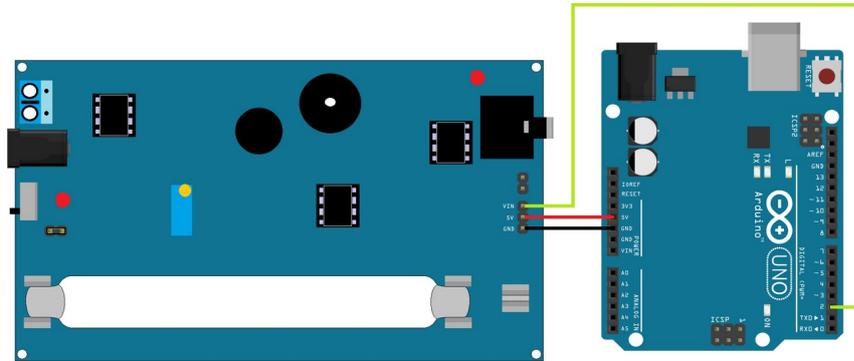


Figura 5: Conexão do geiger com o arduino. Fonte: Arduino DIY Geiger Counter (Murchison, 2019).

O código implementado ao Arduino® possui quatro blocos principais, e um bloco apenas para efeitos visuais na inicialização do programa. As figuras 6, 7, 8 e 9 apresentam partes do código com os principais blocos.

```

1  uint32_t pulsos1, pulsos2;
2
3  #include <Adafruit_GFX.h>
4  #include <Adafruit_SSD1306.h>
5  #include <Fonts/FreeSerif12pt7b.h>
6
7  Adafruit_SSD1306 display(-1);
8
9  void setup()
10 {
11     Serial.begin(57600);
12     pinMode(2, INPUT); // entrada de pulsos do geiger
13     attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(2), contador, HIGH);
14     display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, 0x3C);
15 }

```

Figura 6: Primeiro bloco do código implementado ao arduino. Fonte: O Autor (2024).

O primeiro bloco apenas define as variáveis e inicializa o OLED 0,96". As bibliotecas utilizadas permitem a comunicação do Arduino® com o visor, além da escolha de fontes

variadas. A placa do Geiger-Müller foi conectada na porta digital 2 no modo de interrupção, pois o Arduino® UNO apenas possui os pinos 2 e 3 disponíveis para o modo interrupção. Este modo possibilita que o Arduino® verifique constantemente os pulsos de tensão, de forma que nenhuma contagem seja perdida. A linha 13 foi escrita de forma que sempre que um pulso seja detectado na porta 2, a função “contador” será chamada.

```
17 void contador()  
18 {  
19     pulsos1++;  
20 }
```

Figura 7: Segundo bloco. Função chamada pela linha 13 do código. Fonte: O Autor (2024).

A função “contador” soma 1 sempre que o pino 2 detecta um pulso, armazenando na variável “pulsos1”. Isso resulta em uma contagem sendo armazenada na variável “pulsos1” a cada pulso interpretado no pino 2 do Arduino®.

```
79 void loop()  
80 {  
81     display.clearDisplay();  
82     cpm();  
83     pulsos1=0;  
84     delay(60000);  
85 }
```

Figura 8: Bloco três de repetição do código. Fonte: O Autor (2024).

A função *loop* é principal função de um projeto desenvolvido em um Arduino®, pois permite que o código seja executado de forma contínua. O *loop* chama a função “cpm” e zera as contagens armazenadas em “pulsos1”. Após um minuto (60000 milissegundos) o laço de repetição reinicia. Assim, obtém-se as contagens armazenadas ao longo de um minuto.

```
87 void cpm() {
88
89     display.setTextSize(2);
90     display.setCursor(0,0);
91     display.println("Contagens:");
92     display.setCursor(80,40);
93     display.println("cpm");
94     display.display();
95
96     pulsos2=pulsos1;
97
98     int cpm = pulsos2;
99
100    Serial.println(cpm);
101    display.setCursor(0,24);
102    display.setTextSize(4);
103    display.println(cpm);
104    display.display();
105
106 }
```

Figura 9: Quarto bloco do código implementado ao arduino. Fonte: O Autor (2024).

A função “cpm” realoca os valores armazenados em “pulsos1” para “pulsos2”. Isso é importante pois o bloco três zera a variável “pulsos1” sempre que o laço é repetido. É definida uma variável do tipo *int* (para números inteiros) para armazenar as contagens por minuto. As linhas que seguem tornam possível a visualização das contagens por minuto no visor OLED 0,96”, bem como no próprio monitor de dados do *Arduino IDE*, para monitoramento dos dados obtidos por meio de um computador.

Para realização de testes com o Geiger-Müller, níveis de radiação natural foram avaliados, além de medições com fontes artificiais de amerício-241, de atividade  $2\mu\text{Ci}$  (*PHYWE Radioactive source Am-241, 74 kBq – 09047-51*), disponível para fins didáticos no Laboratório de Ensino de Física das Radiações Ionizantes da Universidade Federal de Uberlândia. As fontes de amerício disponíveis no laboratório são apresentadas na figura 10.

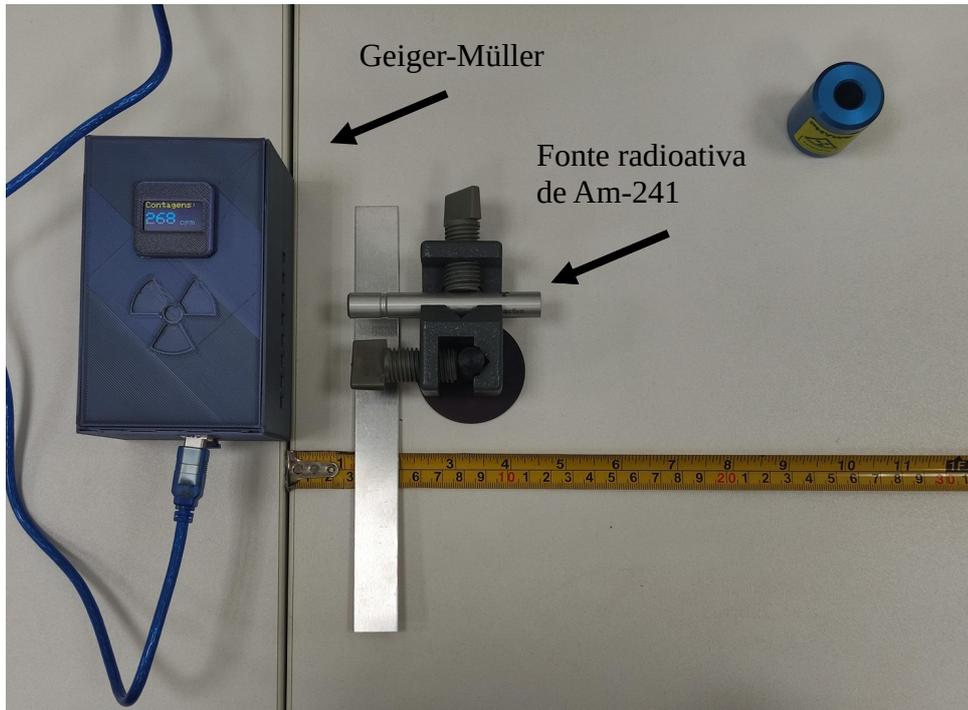


*Figura 10: Fontes de Amerício-241 utilizadas nos experimentos deste trabalho. Fonte: O Autor (2024).*

O experimento de nível de radiação ambiente foi realizado no andar térreo do Instituto de Física da Universidade Federal, ao ar livre. O contador Geiger-Müller foi programado para acumular as contagens ao longo de um minuto. Os dados foram extraídos utilizando o programa *Putty* (Thatam, 1999), um emulador de código aberto que possibilita a extração direta dos dados coletados pelo Arduino® para um arquivo externo, como por exemplo, um arquivo de texto.

Para avaliar os níveis de radiação de uma fonte artificial de amerício-241 *Phywe*, o tubo foi colocado 2 cm distante da fonte. O experimento foi replicado com um contador Geiger-Müller *Phywe Zählrohr Typ A 09025-11*, como forma de se avaliar a validade dos dados obtidos pelo contador Geiger-Müller desenvolvido neste trabalho.

A relação distância fonte-tubo e contagens também foi avaliada em um experimento. A figura 11 mostra a configuração deste experimento.



*Figura 11: Experimento contagens por minuto em função da distância fonte-tubo. É possível ver a caixa do Geiger-Müller, com o contador dentro, e a fonte radioativa em um suporte.  
Fonte: O Autor (2024)*

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A figura 12 mostra a placa do circuito com todos os componentes soldados. O tubo Geiger-Müller se encaixa na parte superior da placa.



Figura 12: Placa do circuito com todos os componentes soldados, onde é possível observar o encaixe para o tubo Geiger-Müller. Fonte: O Autor (2024).

Para determinar o tempo morto do Geiger-Müller, foi realizado um teste utilizando um osciloscópio (SIGLENT SDS 1072CNL). A figura 13 mostra a configuração do teste realizado.

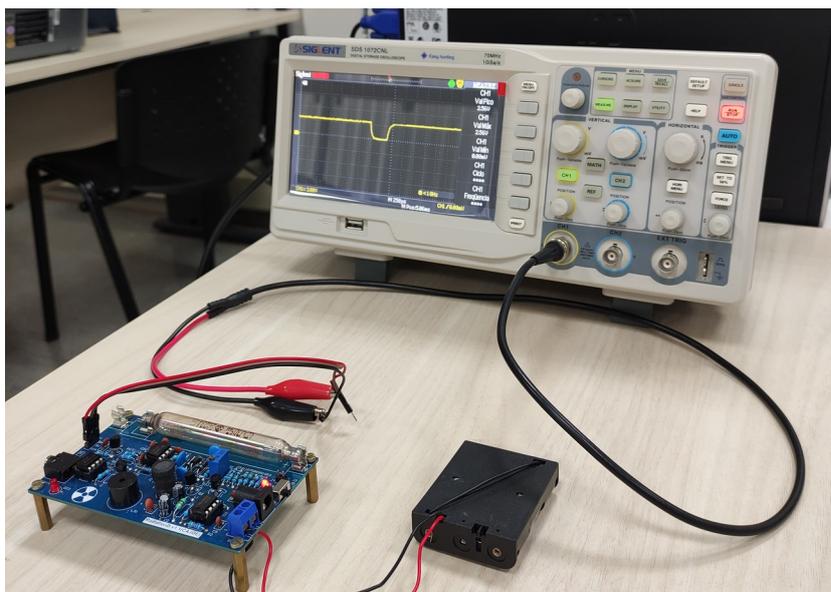


Figura 13: Teste realizado com osciloscópio. Fonte: O Autor (2024).

O osciloscópio foi conectado no pino de saída P3.3. A tensão de saída é de 2,56V. Quando um pulso é captado, a tensão decai para 0V. A figura 14 é uma captura de tela do osciloscópio no momento em que um pulso captado pelo tubo Geiger-Müller. O pulso tem duração de 500  $\mu$ s, correspondente ao tempo-morto do contador.

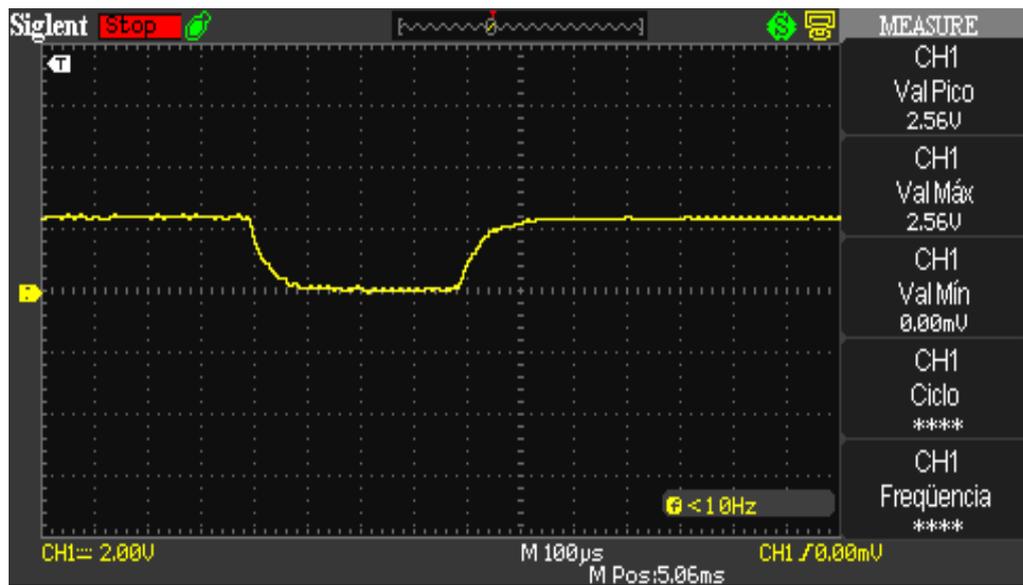


Figura 14: Captura de tela de um osciloscópio conectado ao Geiger-Müller. Fonte: O Autor (2024).

Nos primeiros testes, um visor LCD foi utilizado, juntamente de um Arduino® Nano. A figura 15 mostra as conexões do projeto em uma mini-placa de ensaio. As conexões foram realizadas utilizando-se de *jumpers*.

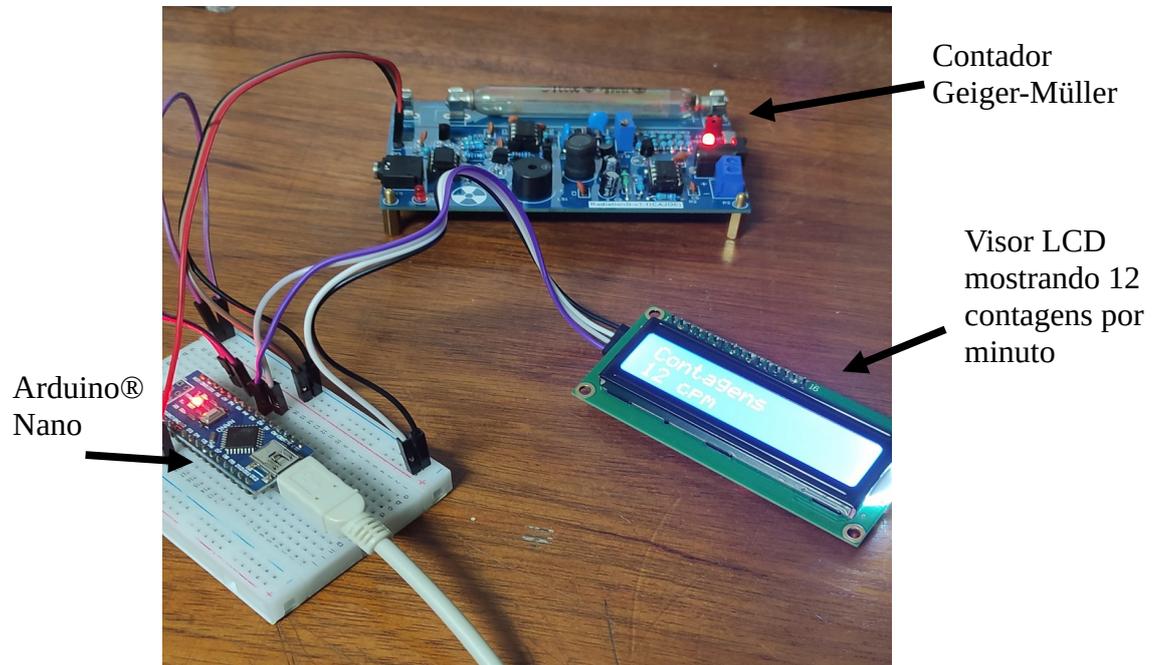


Figura 15: Primeiro teste de conexão do Geiger-Müller. Fonte: O Autor (2024).

Conforme visto na figura 14, o visor LCD foi conectado ao Arduino® por meio de um módulo I2C, de forma a facilitar as conexões. O Arduino® estava conectado ao computador, de forma que fosse alimentado por este. Assim, o próprio Arduino® servia como alimentação para o resto do circuito, com tensão de saída de 5V. O visor mostra um valor de 12 contagens por minuto. Este valor se refere à radiação ambiente, não havendo interferência de fontes artificiais.

Um Arduino® UNO foi utilizado posteriormente, e preferido em razão da praticidade de não haver necessidade de se utilizar uma placa de ensaio. A figura 16 mostra as conexões do projeto.

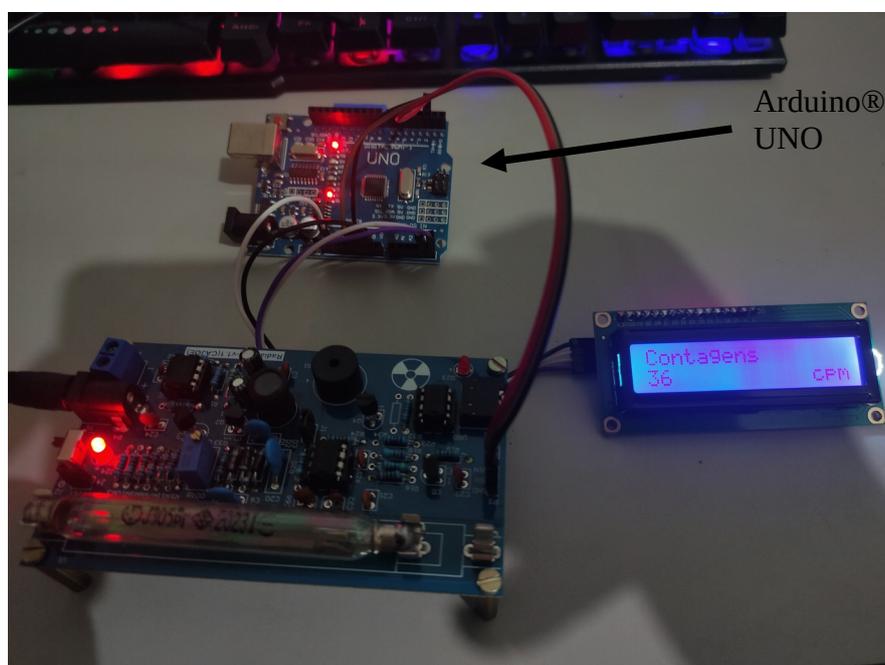
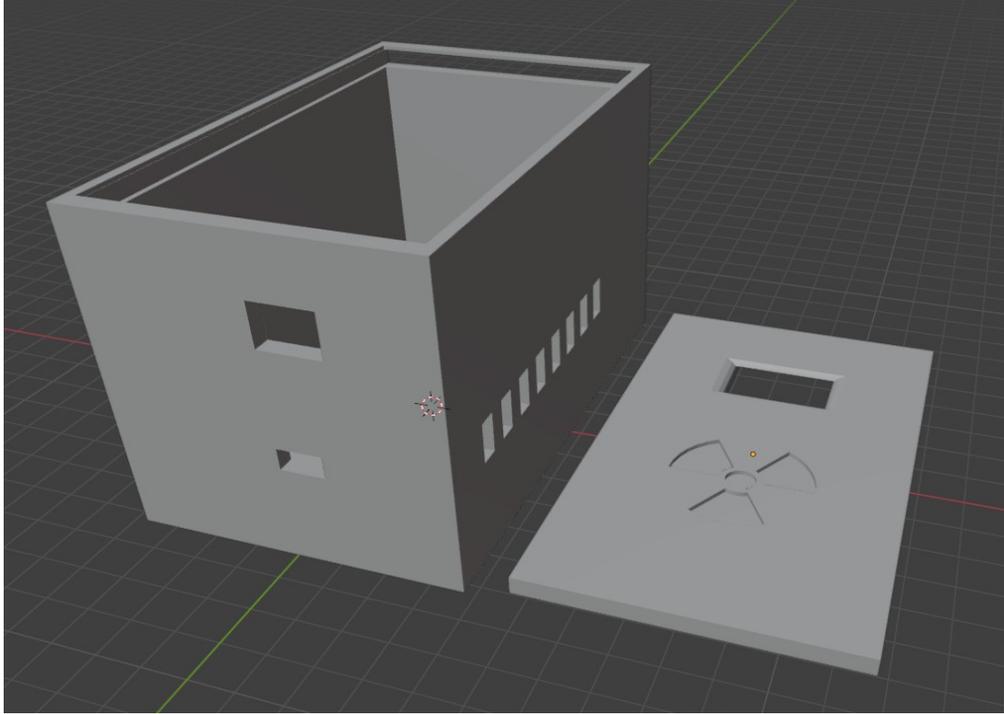


Figura 16: Geiger-Müller montado com um arduino UNO. Fonte: O Autor (2024).

Nesta configuração, o Geiger-Müller está conectado à porta USB de um computador, fornecendo tensão de 5V. O visor LCD mostra um valor de 36 contagens por minuto, também se referindo à radiação de fundo.

Nos últimos testes, o visor LCD de 16 colunas e 2 linhas foi substituído por um visor OLED 0,96", pelo tamanho reduzido e maior quantidade de células programáveis (128x64 do OLED em comparação com 16x2 do LCD). Para acomodar o projeto como um todo, sendo constituído pela placa Geiger-Müller, Arduino® UNO, fonte de alimentação e visor OLED, foi desenvolvida uma caixa em uma impressora 3D, utilizando filamento de biopolímero ácido polilático (PLA), de densidade 1,24g/cm<sup>3</sup>, com *infill* de 10%. A caixa foi modelada no *software* de modelagem tridimensional *Blender* (BLENDER, 1994) e exportada como arquivo STL (acrônimo para estereolitografia). Foi utilizado o *software* PrusaSlicer (PRŮŠA, 2024), um *software* fatiador de código aberto. O programa fatiador gera um arquivo de extensão .gcode, que pode ser lido pela impressora 3D. A figura 17 é uma captura de tela do *software* *Blender*, mostrando a caixa.



*Figura 17: Projeto da caixa do Geiger-Müller. Fonte: O Autor (2024).*

O modelo possui aberturas para conexão USB-B, do Arduino® UNO, e um espaço para inserção de um botão deslizante de liga/desliga. O tubo Geiger-Müller é posicionado na lateral da caixa, onde há os furos, de forma que as paredes da caixa, que possuem 2,5 mm de espessura, não interfiram no transporte da radiação. A tampa da caixa possui apenas a abertura para o visor OLED e o símbolo da radiação em relevo, apenas para fins estéticos.

As figuras 18 e 19 mostram a caixa do Geiger-Müller, já em funcionamento.

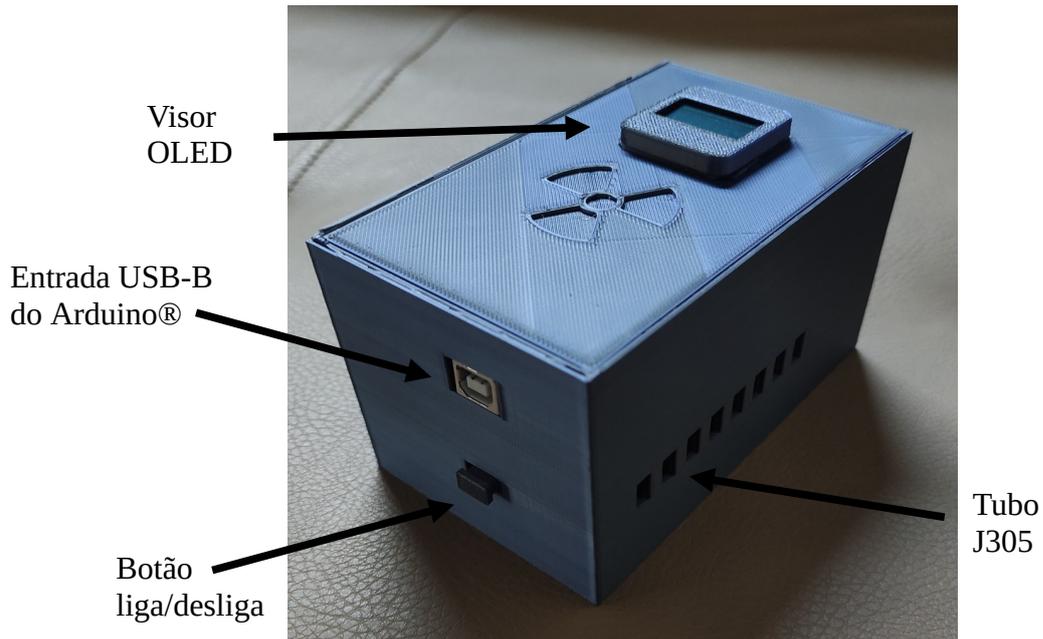


Figura 18: Caixa do Geiger-Müller impressa, já com o projeto dentro. Fonte: O Autor (2024).

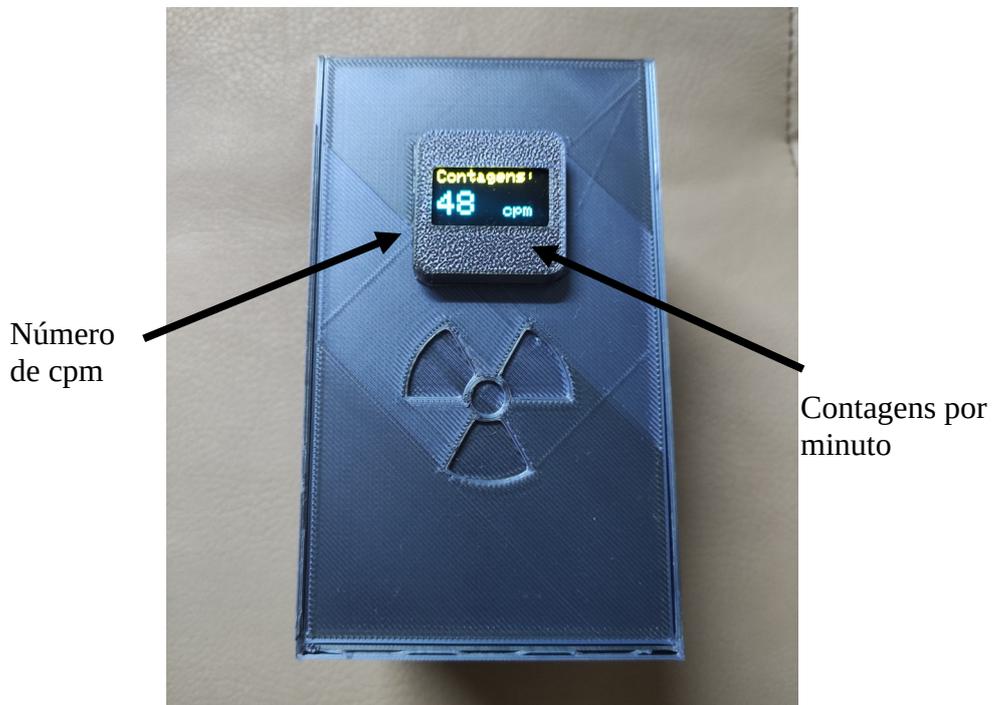


Figura 19: Geiger-Müller em funcionamento. O visor mostra 48 contagens por minuto, referente à radiação de fundo. Fonte: O Autor (2024).

Com o projeto finalizado, foram realizados testes de níveis de radiação ambiente, bem como avaliação de radiação artificial de uma fonte de amerício-241 de  $2\mu\text{Ci}$  *Phywe*. Para realizar os testes, o *Arduino®* foi configurado para iterar as contagens ao longo de um minuto.

A figura 20 mostra os valores de contagens por minuto referente à radiação de fundo de 100 medidas plotado na ferramenta de plotagem do *LibreOffice Calc*. O valor médio para contagens por minuto registrado foi de  $27,53 \pm 5,67$  cpm.

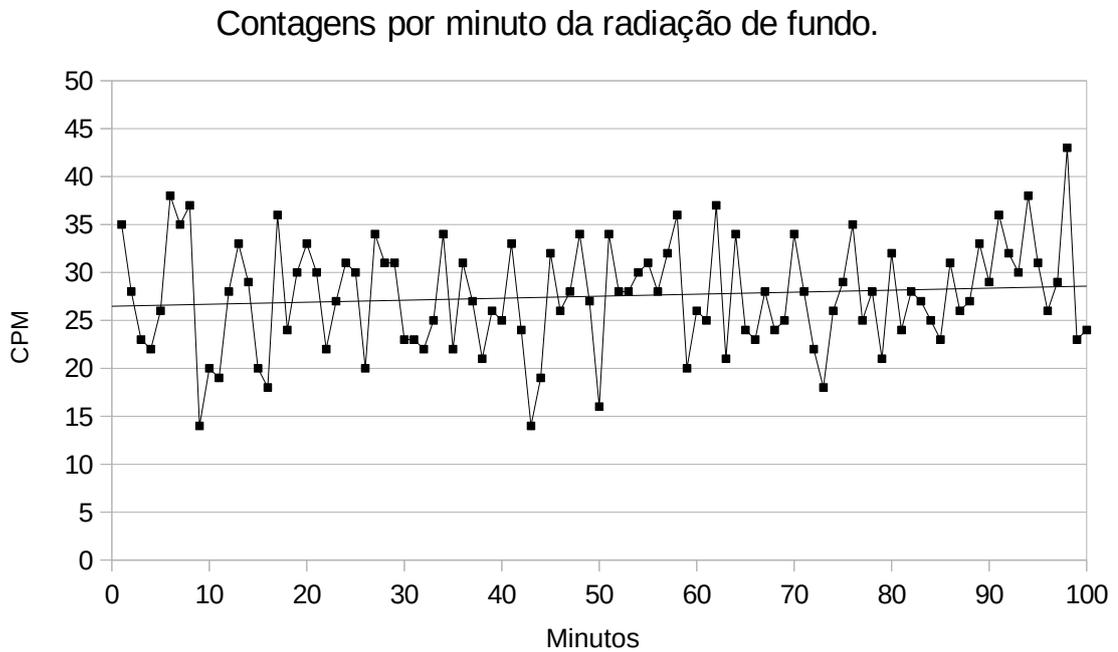
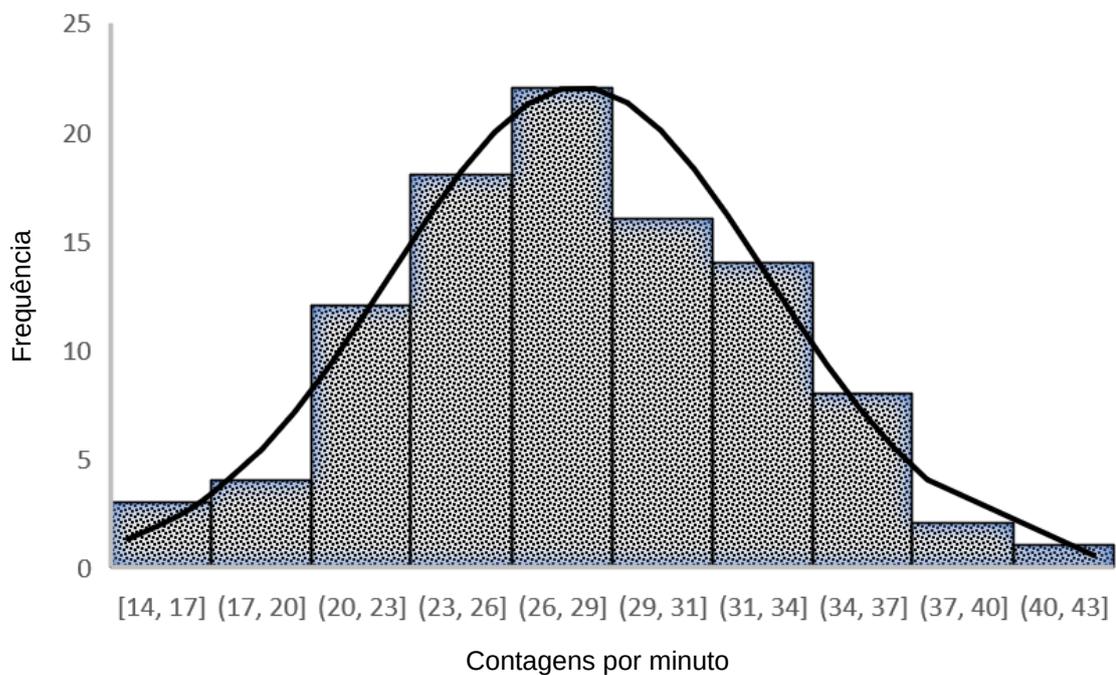


Figura 20: Gráfico de contagens por minuto da radiação de fundo. Fonte: O Autor (2024).

A figura 1 mostra um histograma da radiação de fundo, demonstrando a frequência em que cada valor de contagem por minuto é obtido, em 100 medidas. O histograma apresenta um valor médio de 27,53 cpm, com desvio padrão de 5,67 cpm. Para a plotagem deste gráfico, os dados foram agrupados em classes. A curva em preto representa um ajuste da distribuição de Poisson. Essa curva expressa a probabilidade de um evento aleatório ocorrer em um intervalo de tempo  $t$ , como por exemplo, uma partícula cósmica decair e interagir com o gás no interior do tubo Geiger-Müller.



*Figura 21: Histograma das contagens por minuto de radiação de fundo. Fonte: O Autor (2024).*

Para avaliar a sensibilidade do tubo do Geiger-Müller a fontes artificiais, foi utilizado uma fonte *Phywe* de amerício-241, conforme supracitado. A fonte foi colocada a uma distância de 2 cm do tubo, e então foram tomadas 60 medidas com iterações de um minuto.

Os resultados são mostrados na figura 22, com valor médio de  $238,30 \pm 16,84$  cpm para níveis de radiação da fonte artificial de amerício-241.

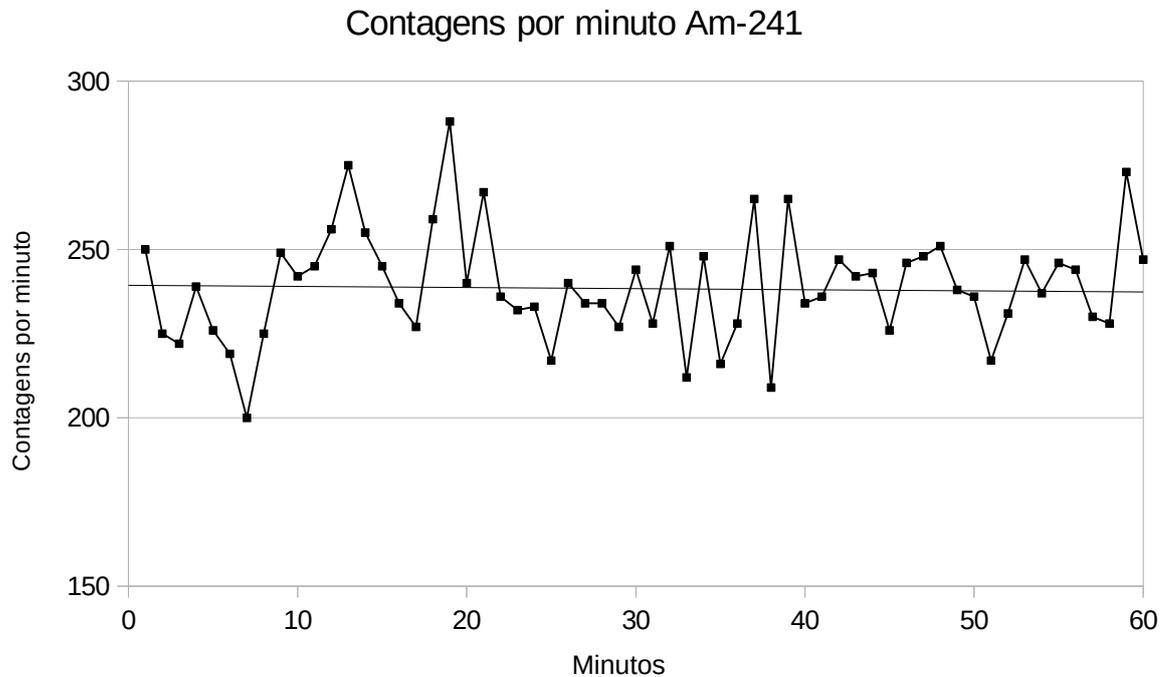


Figura 22: Gráfico das contagens por minuto de uma fonte de amerício-241. Fonte: O Autor (2024).

O mesmo experimento foi realizado utilizando um Geiger-Müller *Phywe Cobra3* (*PHYWE Cobra3 GM – ZÄHLROHR/TUBE*), obtendo o valor médio de  $211,61 \pm 18,56$  cpm. Considerando apenas os valores médios obtidos pelo contador Geiger-Müller desenvolvido neste trabalho e pelo medidor *PHYWE*, há um erro relativo de 12,61%.

A figura 22 mostra a frequência de contagens da fonte de amerício-241. O histograma apresenta um valor médio de 238,30 cpm, com desvio padrão de 16,84 cpm. E, de mesma forma, há uma aproximação de uma distribuição de Poisson, o que é esperado neste tipo de evento. Utilizando a mesma fonte, foi avaliada a relação contagens por minuto em função da distância, em milímetros. O gráfico 23 mostra os resultados deste experimento.

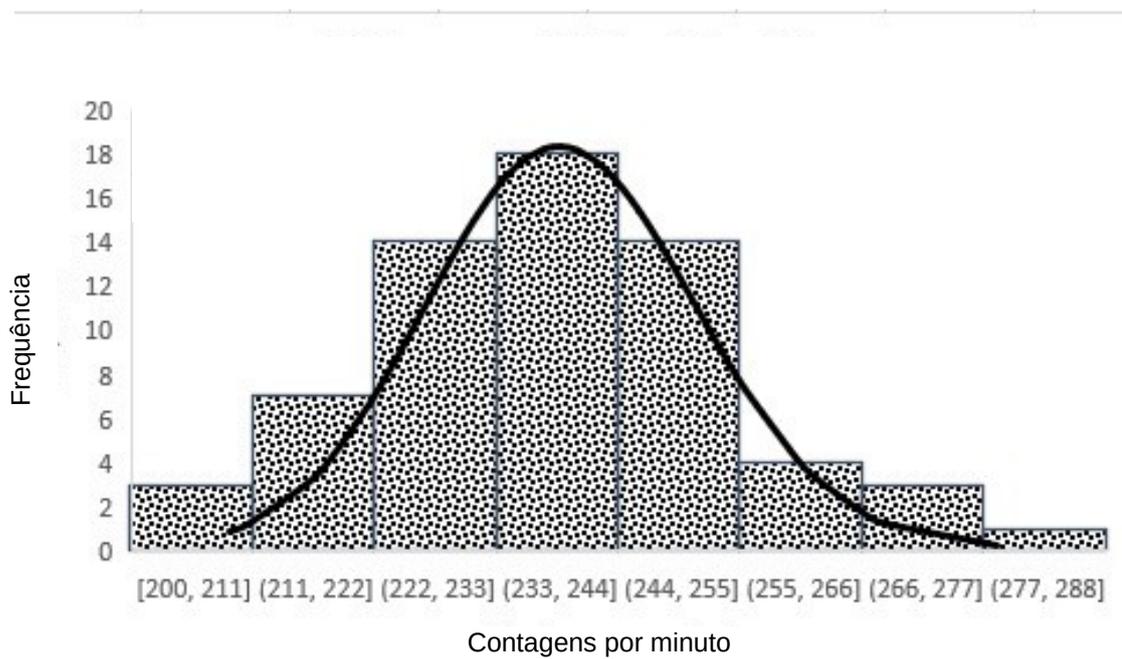
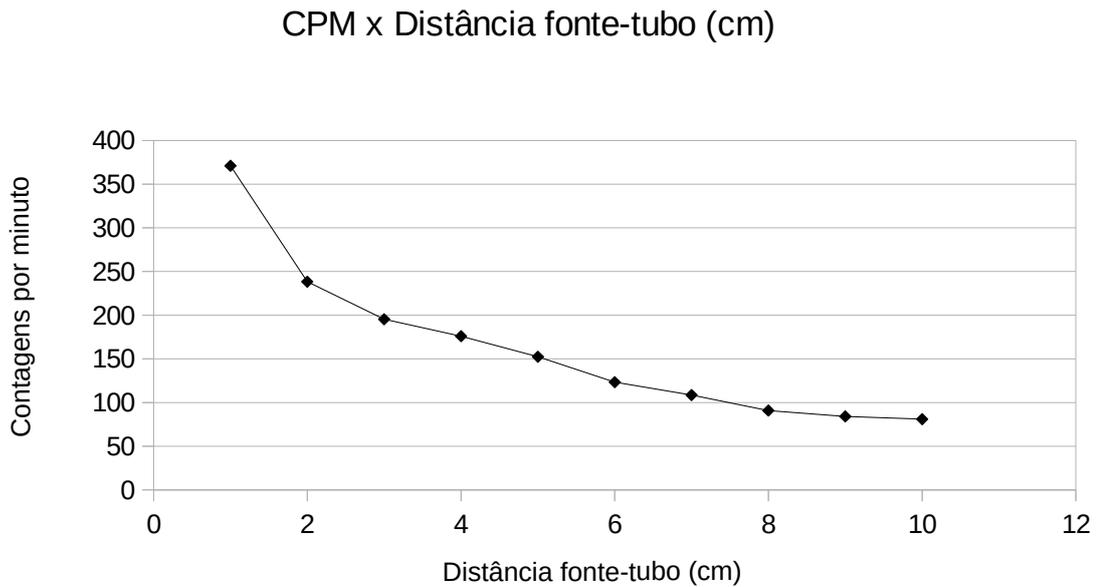


Figura 23: Histograma de contagens de uma fonte de amerício-241. Fonte: O Autor (2024).

Para a plotagem do gráfico da figura 24, a distância entre a fonte e o tubo foi variada em passos de 1 cm. Para cada distância, foram coletadas dez medidas de contagens por minuto, sendo estas iteradas ao longo de um minuto. O valor médio de cada distância foi considerado.



*Figura 24: Gráfico contagens por minuto em função da distância fonte-tubo. Fonte: O Autor (2024).*

Analisando o gráfico, as contagens diminuem com o aumento da distância fonte-tubo, conforme esperado. Este fenômeno é ditado pela lei do inverso do quadrado da distância.

## 5. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou detalhadamente a construção de um contador Geiger-Müller com materiais de baixo custo. O detector de radiação foi incorporado à plataforma Arduino®, como mecanismo de tratamento das contagens obtidas pelo aparelho. Um visor *OLED* de 0,96” foi utilizado para visualização das contagens. O projeto teve sua forma final em uma caixa desenvolvida em uma impressora 3D utilizando filamento de biopolímero PLA.

Em testes conduzidos em um osciloscópio, o tempo-morto para o Geiger-Müller deste trabalho foi de 500  $\mu$ s. Em experimentos com radiação de fundo, presente nos materiais de construção utilizados nas paredes de casas e prédios, além da própria radiação cósmica, foi possível obter um valor médio de  $27,53 \pm 5,67$  cpm. Também foram realizados experimentos utilizando uma fonte artificial, disponível no laboratório de ensino de física das radiações ionizantes, de amerício-241 *Phywe*, sendo possível chegar em um valor médio de  $238,30 \pm 16,71$  cpm. Comparando os resultados com um contador Geiger-Müller de referência, da marca *Phywe*, é encontrado um erro relativo de 12,61%.

Através dos resultados dos experimentos, foi possível apurar a natureza probabilística do decaimento radioativo, considerando aproximações dos histogramas à distribuição de Poisson. Também foi possível verificar a lei do inverso do quadrado da distância, por meio de diversas tomadas de medidas em diferentes distâncias fonte-tubo.

Dessa forma, o contador Geiger-Müller construído neste trabalho foi capaz de operar como um dosímetro com sucesso em diferentes experimentos, sendo possível estender sua utilização em aulas práticas de laboratório no ramo da Física Médica, com resultados próximos aos obtidos com contadores didáticos.

Deixam-se abertas perspectivas futuras para este projeto, como a utilização de um microcontrolador *ESP-32* com placa *Wi-Fi* e conexão *bluetooth*, permitindo coleta de medidas por meio de um aplicativo de celular. Além disso, testes futuros podem ser conduzidos para determinar a atenuação da caixa impressa, que pode ser remodelada, a depender da necessidade. Em conjunto com um projeto em execução, o contador Geiger-Müller desenvolvido neste trabalho poderá atuar com uma câmara de nuvens, de forma a se obter numericamente a quantidade de partículas que interagem no seu volume sensível.

## REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, M. P. P. **Projeto, Construção e Calibração de Câmaras de Ionização de Placas Paralelas para Radiação-X**. 1989. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear – Aplicações) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo. Disponível em: <http://repositorio.ipen.br/handle/123456789/9925>. Acesso em: 10 de mar. de 2024.

ARDUINO®. **Getting Started with Arduino – Guide**. 2020. Disponível em: <https://www.arduino.cc/en/Guide>. Acesso em: 15 de mar. de 2024.

ATTIX, F. H. **Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry**. John Wiley & Sons, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KgaA, 1986. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/9783527617135>.

BLENDER FOUNDATION. **Blender**. 1994. Disponível em: <https://www.blender.org/>. Acesso em: 16 de mar. de 2024.

BRAVIM, A. **Aplicação das técnicas de dosimetria termoluminescente (TL) e luminescência opticamente estimulada (OSL) na determinação de curvas de isodose em uma simulação de tratamento de câncer pela técnica de radioterapia em arco modulado volumétrico – VMAT**. 2015. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear - Aplicações) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo. DOI: 10.11606/T.85.2015.tde-30072015-132845.

CASTRO, E. V.; GARCÍA, L. D. Validación de un Contador Geiger-Müller para verificar la exposición a la radiación en salas de radiología convencional. **Cuaderno de investigaciones: semilleros andina**, n. 11, 14 nov. 2018. DOI: <https://doi.org/10.33132/issn.2619-6301>.

CAVALCANTE, M. A.; TAVOLARO, C. R. C.; MOLISANI, E. Física com Arduino para iniciantes. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v.33, n.4, 4503, 2011. DOI: 10.1590/S1806-11172011000400018.

CONNOR, N. **What is a Geiger Counter**. Radiation Dosimetry. 2019. Disponível em: <https://www.radiation-dosimetry.org/what-is-geiger-counter-geiger-mueller-detector-definition/>. Acesso em: 16 de mar. de 2024.

Geiger-Muller tubes: Comparison of SBM20, J305 and LND712. **IOT devices**, 2023. Disponível em: <https://iot-devices.com.ua/en/comparison-of-geiger-muller-tubes-sbm20-j305-and-lnd712/> Acesso em: 02 de abr. de 2024.

GEIGER, H.; RUTHERFORD, E. An electrical method of counting the number of  $\alpha$ -particles from radio-active substances. **Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 81, n. 546, p. 141 – 161, 1908. DOI:10.1098/rspa.1908.0065

GEIGER, H.; NUTTALL, J. M. The ranges of the  $\alpha$  particles from various radioactive substances and a relation between range and period of transformation. **Philosophical Magazine**, v. 22, n. 130, 1911. Publicado online em 2009. DOI: 10.1080/14786441008637156.

Guide for I2C OLED Display with Arduino. **Random Nerds Tutorial**, 2016. Disponível em: <https://randomnerdtutorials.com/guide-for-oled-display-with-arduino/>. Acesso em: 16 de mar. de 2024.

How to Read the Arduino Schematic Diagram. **Learn @ Circuitrocks**. Disponível em: <https://learn.circuit.rocks/the-basic-arduino-schematic-diagram>. Acesso em: 02 de abr. de 2024.

KAKUNO, E. M. Montagem e teste de detector Geiger Muller usando tubo SBM19. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v.36, n.1, 2014. DOI: 10.1590/S1806-11172014000100015.

KNOLL, G. F. **Radiation Detection and Measurement**. John Wiley & Sons, 4ª ed, 2010.

MARTIN, J. E. **Physics for Radiation Protection**. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2013. DOI: 10.1002/9783527667062.

MURCHISON, J. **Arduino DIY Geiger Counter**. AutoDesk Instructables, 2019. Disponível em: <https://www.instructables.com/Arduino-DIY-Geiger-Counter/>. Acesso em: 10 de mar. de 2024.

OKUNO, E.; YOSHIMURA, E. M. **Física das Radiações**. Oficina de Textos, 2010.

PRŮŠA, J.. **Prusa Slicer**. PRUSA RESEARCH, 2024. Disponível em: [https://www.prusa3d.com/en/page/prusaslicer\\_424/](https://www.prusa3d.com/en/page/prusaslicer_424/). Acesso em: 20 de mar. de 2024.

RIBEIRO, D. Contador de Geiger-Müller. **Revista de Ciência Elementar**. v. 2, n. 4, 2014. DOI: 10.24927/rce2014.087.

SHAMPO, M. A.; KYLE, R. A.; STEENSMA, D. P. Hans Geiger – German Physicist and the Geiger Counter. **Mayo Clinic Proceedings**. v. 86, n. 12, 2011. DOI: 10.4065/mcp.2011.0638.

TAUHATA, L; SALATI, I. P. A.; DI PRINZIO, R.; FERNANDEZ, V. **Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos**. Instituto de Radioproteção e Dosimetria, Comissão Nacional de Energia Nuclear, Rio de Janeiro, 2014.

THATAM, S. **PUTTY: a free SSH and Telnet client**. 1999. Disponível em: <https://www.putty.org/>. Acesso em: 04 de abr. de 2024.

## ANEXO I: COMPONENTES DO CIRCUITO GEIGER

Tabela A.1: Lista de componentes do kit Geiger-Müller. Fonte: Disponibilizado pelo fornecedor.

Tipo de componente		Quantidade
Resistor	1K $\Omega$	2
	3K $\Omega$	1
	5,1K $\Omega$	1
	10K $\Omega$	2
	33K $\Omega$	2
	47K $\Omega$	1
	100K $\Omega$	1
	470K $\Omega$	3
	10M $\Omega$	6
Capacitor	100 $\mu$ F	2
	100nF	5
	1nF	2
	270pF	1
	10nF	3
Indutor	100 $\mu$ H	1
	10mH	1
Diodo	-	5
Buzzer 5V	-	1
Potenciômetro	-	1
Amplificador	LM358P	1
	NE555P	2