

PROTÓTIPO DETECTOR DE FAÍSCAS PARA PARTÍCULAS ALFA: UMA PROPOSTA EDUCACIONAL SEM USO DE FONTES RADIOATIVAS

SPARK DETECTOR PROTOTYPE FOR ALPHA PARTICLES: AN EDUCATIONAL PROPOSAL WITHOUT THE USE OF RADIOACTIVE SOURCES

Alexandre Gabriel Maquera¹ [alexandre.maquera@ifpr.edu.br] -

Fábio Melquiades² [fmelquiades@uel.br]

Osmar Henrique Moura da Silva² [osmarh@uel.br]

Renê Menck Toginho³ [renegki@gmail.com]

Paulo Rogério Catarini da Silva² [prcsilva@uel.br]

Carlos Eduardo Laburú² [laburu@uel.br]

Rodrigo Oliveira Bastos⁴ [rbastos@unicentro.br]

1 - Instituto Federal do Paraná, Campus Paranavaí, PR.

2 - Departamento de Física, Universidade Estadual de Londrina, PR.

3 - Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Londrina, PR.

4 - Departamento de Física, Universidade Estadual do Centro-Oeste, Guarapuva, PR.

RESUMO

Este trabalho se insere numa linha de publicações que estabelecem contribuições ao ensino da Física Moderna, especialmente à Física Nuclear em nível médio de ensino. Nesse contexto, muitas propostas apresentam fenômenos reais por meio de simulações computacionais sem atividade experimental. Isso se deve, por exemplo, devido ao elevado custo de um detector de radiação e a regulamentação burocrática para o uso de uma fonte radioativa no Brasil, exigindo cuidados especiais de manuseio e armazenagem dela. Assim, o presente estudo objetivou apresentar um protótipo de um detector de faíscas de baixo custo via Arduino, com a finalidade educacional de favorecer o entendimento dos princípios de funcionamentos dos medidores tradicionais de radioatividade quando simula experimentalmente a coleta de dados sem o emprego de fontes radioativas. Para isso, o protótipo foi inicialmente testado, de modo qualitativo e sem quaisquer calibrações para detecção de radiação ionizante (partículas alfa) de uma fonte de Amerício-241. Posteriormente a fonte radioativa foi substituída por uma fonte alternativa que simula uma detecção equivalente, capaz de ser vantajoso e viável à instrução do princípio físico de funcionamento envolvido na contagem de fonte radioativa, atrelando-se uma atividade experimental. Tal alternativa viabiliza o uso do protótipo para aplicação em feiras de ciências e em sala de aula.

PALAVRAS-CHAVE: Ensino básico, protótipo detector de faíscas via Arduino, baixo custo, princípio de funcionamento da detecção da radiação ionizante, simulação sem uso de fontes radioativas.

ABSTRACT

This work is part of a line of publications that establish contributions to the teaching of Modern Physics, especially Nuclear Physics at the high school level. In this context, many proposals in general represent real phenomena through simulations without experimental activity, taking into account, for example, the high cost of a radiation detector and the bureaucratic regulation of the use of a radioactive source in Brazil, involving special care of handling and storage. Thus, the present work aimed to present a prototype of a low cost spark detector via Arduino, with the educational purpose of favoring clarifications of the principles of operation of traditional radiation meters by experimentally simulating detections without using radioactive sources. For this, the prototype was initially tested, qualitatively and without any calibrations, for the detection of ionizing radiation (alpha particles) from an Americium-241 source, later replacing the source with an alternative that simulates equivalent detection, which in this way can be profitable and viable to the instruction of the physical principle of operation involved in the counts, linking an experimental activity. Such an alternative makes it possible to use the prototype for application in science fairs and in the classroom.

KEYWORDS: Basic education, spark detector prototype via Arduino, low cost, working principle of ionizing radiation detection, simulation without using radioactive sources.

INTRODUÇÃO

A cada ano mais e mais professores de Física procuram levar aos seus alunos assuntos que lhes chamem a atenção e que possam abordar os conceitos e conhecimentos pertinentes à matéria de física do nível de ensino médio. Um assunto que se destaca é o de Física Moderna, em especial a Física Nuclear. Nesse contexto, muitas propostas geralmente representam fenômenos reais por meio de simulações computacionais sem atividade experimental. Isso se deve ao fato do elevado custo de um detector de radioatividade, além da regulamentação burocrática exigida para o uso de uma fonte radioativa no Brasil, envolvendo cuidados especiais de manuseio e armazenagem da mesma. Desta forma, o presente estudo vem proporcionar a possibilidade de se distinguir e esclarecer princípios de funcionamentos de medidores tradicionais de radioatividade ao simular as detecções sem uso de fontes radioativas. Para tanto, um protótipo de detector de radiações ionizantes de baixo custo, via Arduino foi proposto. Cabe enfatizar que, por não envolver fontes radioativas, a presente proposta torna-se viável na educação básica em respeito à advertência de Silva et al. (2022, p. 81) acerca da “*normativa à situação em questão*”, descaracterizando a necessária licença da CNEN¹ quanto ao emprego de material radioativo.²

¹ Comissão Nacional de Energia Nuclear.

² “A isenção de qualquer fonte ou prática deve ser sempre sujeita à aprovação pela CNEN e depende, também, de condições específicas de controle, uso ou deposição, levando em conta as propriedades físicas e químicas do material radioativo” (CNEN, 2011, p. 2).

Basicamente, o protótipo constitui-se num contador de faísca que opera em regime de descarga automantida, induzida pela ionização colunar produzida no ar pela interação da radiação incidente nos eletrodos de geometria fio-plana do tipo Chang-Rosenblun (CHANG & ROSENBLUN, 1945)³. Inclusive, existem na internet propostas de montagens desse modelo para demonstração de tal detecção⁴. Em termos educacionais e mantendo essa geometria fio-plana para eletrodos, Dierka e Bastos (2016) apresentam uma simples montagem de um detector de faíscas para partículas alfa testado com uma fonte de Amerício (Am-241)⁵ por meio das faíscas elétricas. Esses autores (ibid.) fornecem instruções procedimentais qualitativas factíveis para determinação do tipo de radiação/partícula detectada, estudo da sensibilidade do detector em relação à variação do ângulo de incidência da partícula e seu alcance, além da determinação da intensidade de radiação. Considerando isso e o crescente número de trabalhos em ensino de Física que empregam o moderno dispositivo Arduino em distintas situações experimentais, este estudo apresenta um protótipo inovador e de fácil montagem de um detector de faíscas que viabiliza contagens radioativas em um display. Para isso, o protótipo foi inicialmente testado, de modo qualitativo e sem quaisquer calibrações, para detectar a radiação ionizante não colimada de uma fonte de Amerício-241 (partículas alfa) de um laboratório licenciado pela CNEN. Posteriormente, substituiu-se a fonte radioativa por uma fonte alternativa que faz uso de um soprador ou secador de cabelo para simular a mesma detecção. Essa alternativa, portanto, torna-se útil e viável para a instrução do princípio físico de funcionamento envolvido na detecção das partículas alfa, constituindo-se numa atividade experimental ao professor do nível básico de ensino que dispensa uso de fontes radioativas.

PRINCÍPIOS FÍSICOS ENVOLVIDOS

O Am-241 sofre decaimento radioativo através da emissão de partículas alfa (α), nas seguintes proporções: a) 85% em α de 5,49 MeV, para Np-237m que, por sua vez, emite um raio gama (γ) de 0,06 MeV; b) 13% em α de 5,44 MeV, para Np-237m que, por sua vez, emite um γ de 0,103 MeV (FILHO HEILBRON et al., 2004, p. 241). Todavia, o processo de perda de energia de partículas carregadas é bastante distinto das radiações sem carga como os raios X ou γ e nêutrons. Enquanto “*um fóton ou nêutron incidente sobre um material pode passar através dele sem nenhuma interação e conseqüentemente sem nenhuma perda de energia*”, uma “*partícula carregada interage através da força Coulombiana com elétrons ou núcleos de*

³ A ideia de usar uma descarga em faísca para a detecção de radiações ionizantes surgiu em 1934, quando Greinacher (GREINACHER, 1934) descreveu um arranjo onde partículas ionizantes, ao passarem pela região sensível entre dois eletrodos (um deles cilíndrico terminado por uma ponta fina, e outro plano) eram registradas por faíscas que atravessavam o espaço entre eles. Modelos de contadores de faísca podem ter eletrodos diferenciados que se apresentam “*sob forma de ponta-cilindro (contador de Greinacher), fio-fio, fio-placa (contador de Chang e Rosenblun) ou ainda placas paralelas, dependendo de sua utilização*” (GONÇALVES, 1993, p. 36).

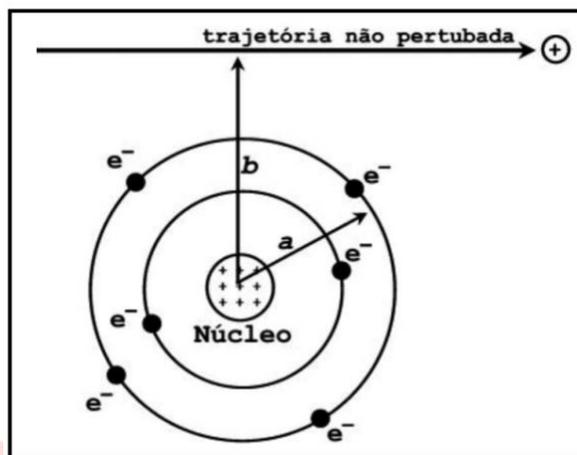
⁴ Exemplo: **Alpha Particle Spark Detector Homemade**. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=XI2p6SeXneE>>. Último acesso: 7 de fevereiro de 2020.

⁵ Todavia, com atividade superior ao limite de isenção imposto pela CNEN (CNEN, 2011, p. 9), o que de certo modo legalmente inviabilizam demonstrações em sala de aula.

⁶ Ou “*perder toda sua energia em um ou alguns poucos eventos catastróficos*”.

praticamente todos os átomos pelos quais ela passe” (FONSECA et al., 2010, p. 2305)⁷. Considerando que a energia para excitar um elétron de um gás varia entre 25 a 40 eV (KNOLL, 1988), pelos valores acima é possível estimar que, no ar ambiente, uma partícula alfa sofra 10^5 interações antes de perder toda sua energia (FONSECA et al., 2010, p. 2305). São três tipos possíveis de interações coulombianas, caracterizadas por um definido parâmetro de impacto b : $b \ll a$ ⁸, $b \sim a$ ⁹ e $b \gg a$ (Figura 1).

Figura 1 – Ilustração da trajetória (não perturbada) de uma partícula carregada incidindo com parâmetro de impacto b com um átomo.



Fonte: Zamorano et al. (2010, p. 2305).

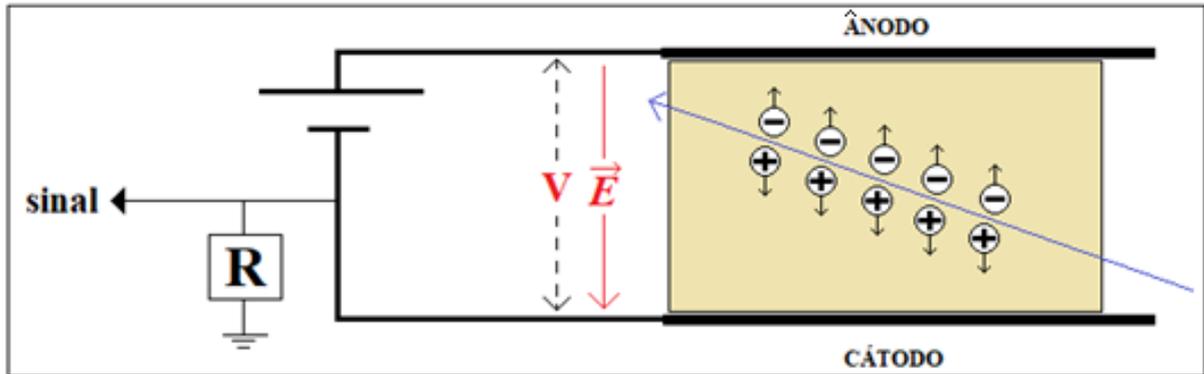
Tais interações coulombianas são importantes para esclarecer o princípio físico de funcionamento de alguns detectores que estabelecem uma diferença de potencial entre eletrodos distanciados em ar atmosférico (ou gás), em cuja região se dá a detecção de radiações ionizantes. O princípio físico pode ser caracterizado pelo percurso de uma partícula carregada (ou fóton de determinada energia) na região sensível do detector. A partícula carregada ioniza o meio e produz pares elétron-íon. Devido a um campo elétrico previamente estabelecido, os elétrons migram para o ânodo e os íons para o cátodo. Isso produz um sinal que origina um pulso de corrente elétrica que flui através de um resistor R . Esse sinal normalmente passa por um circuito amplificador de modo a obter uma altura de pulso relacionada com a quantidade de ionização produzida. Essa, por sua vez, depende principalmente da densidade e estrutura atômica do meio ionizável, além da energia e carga da partícula incidente. A Figura 2 apresenta um esquema básico comum em três tipos de detectores de radiação que operam por esse princípio físico, que são: a *câmara de ionização*, o *contador proporcional* e o contador *Geiger-Müller*.

⁷ Segundo Chang e Rosenblun (1945, p. 227), em detectores de faíscas fio-placa “a região é muito estreita” e “está confinada próxima ao fio”, de modo que partículas beta ou radiações gama, “ao passarem através dessa região tão pequena, podem produzir poucos ou nenhum íon”, “situação diferente para uma partícula alfa, devido ao seu poder ionizante muito maior”.

⁸ Caso de interação da força coulombiana que pode ser diretamente com o núcleo, sendo relevante para elétrons que são espalhados em processos elásticos sem emitir raios X ou excitar o núcleo, e com perda de energia insignificante de forma a satisfazer a lei da conservação de momento para este tipo de colisão (ibid.).

⁹ Probabilidade de a partícula interagir primariamente com um único elétron atômico com grande transmissão de energia cinética, cujo elétron ejetado dá-se o nome de raio delta (δ) (ibid.).

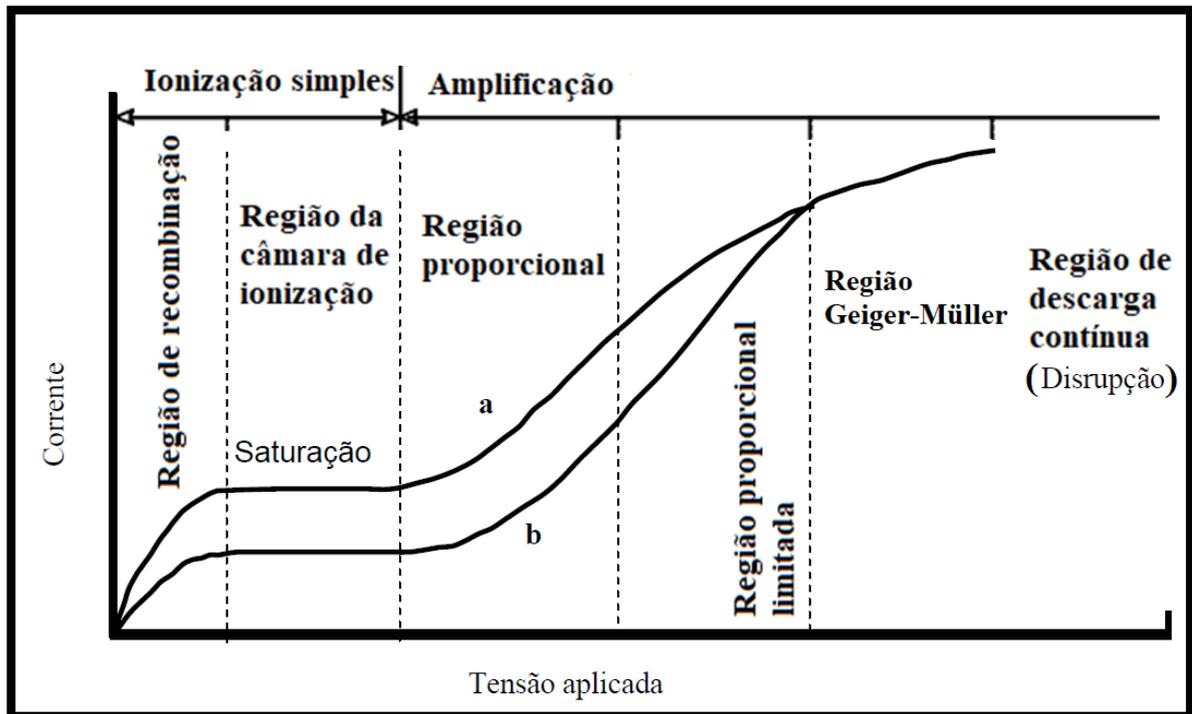
Figura 2 – Esquema básico de um detetor de radiação. A seta azul indica o caminho de uma partícula alfa.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Esses detectores se distinguem em suas operações quanto ao comportamento da corrente elétrica (obtida pelos íons coletados) em função da tensão aplicada entre o ânodo e o cátodo. Uma análise qualitativa pode ser sintetizada, seguindo o gráfico da Figura 3¹⁰.

Figura 3 – Corrente elétrica (obtida pelos íons coletados) em função da tensão aplicada. Curva característica e regiões de operação para detectores a gás (ou ar). Os fótons da curva a são mais energéticos que os da curva b.



Fonte: Adaptado de Knoll (1988, p. 162).

¹⁰ Correspondente aos estudos iniciais desenvolvidos por Townsend sobre a variação da corrente entre dois eletrodos planos em um gás em função do campo elétrico aplicado.

Pela Figura 3, a chamada região de recombinação ocorre numa faixa de diferença de potencial relativamente pequena, em que o campo elétrico não impede os elétrons e os íons de se recombinarem logo após a ionização, mas com poucos deles chegando aos eletrodos e assim caracterizando um sinal que não corresponde à realidade dos pares gerados. Nessa situação, um aumento da tensão aplicada traz um aumento da fração de elétrons recolhidos em relação à dos recombinados, o que implica num ganho de corrente. Elevando-se a tensão para além da região de recombinação, tem-se um sinal que reflete a quantidade total de ionização produzida, pois o campo elétrico já é suficiente para que todos os portadores de carga sejam coletados, com um ligeiro aumento desse campo a partir daí sem que haja alterações no sinal. Essa faixa de operação é denominada região de ionização¹¹. Nela cabe um eletrômetro para medir o sinal de corrente em razão de ser diminuta em tal região. Aumentando ainda mais a tensão, os elétrons livres ganham energia suficiente para produzir outras ionizações e, ao serem liberados nessas ionizações secundárias, são também acelerados, o que causa mais ionizações, resultando numa avalanche de íons. Consequentemente, o sinal de saída torna-se maior, mas ainda proporcional à quantidade inicial de ionização, sendo que o aumento de ionização, a partir daí, é chamado de *amplificação de sinal* ou *multiplicação*¹². Para tensões ainda maiores, alcança-se a região na qual se gera uma avalanche de pares elétron-íon, chamada de região Geiger-Müller, em que a maior energia dos elétrons ionizados primários pode fortemente excitar e/ou ionizar outros átomos, produzindo mais elétrons livres. Por fim, se a tensão for elevada além da região Geiger-Müller, há rompimento da rigidez dielétrica do gás (ou ar atmosférico). Isso gera descargas mesmo sem que haja a incidência da radiação ali presente, e a câmara deixa, inclusive, de ser sensível a qualquer tipo de radiação.

Este último caso mencionado acima representa o fenômeno de uma descarga elétrica entre eletrodos distanciados em ar atmosférico (ou gás), mediante processo de ionização por colisões, que pode ser provocado por incidência de partículas ionizantes e/ou fotoionização¹³ (BARTINIKAS, 2002), na medida em que o campo elétrico aplicado tenha sua intensidade superior ao valor mínimo suportado por esse meio. Estabelecido o campo elétrico por uma diferença de potencial entre os eletrodos, denominada tensão de ruptura V_R (ou *Breakdown* (V_{BR})). Esta, por sua vez¹⁴, tem um valor que depende do produto entre a pressão do ar (ou gás) e a distância dos eletrodos ($p.d$). Na Figura 4, as curvas de Paschen exibem potenciais de ruptura para vários produtos $p.d$ (pressão vezes distância) em diferentes meios gasosos (NASSER, 1971), com relações graficamente lineares entre as grandezas a partir de determinados valores do produto $p.d$.

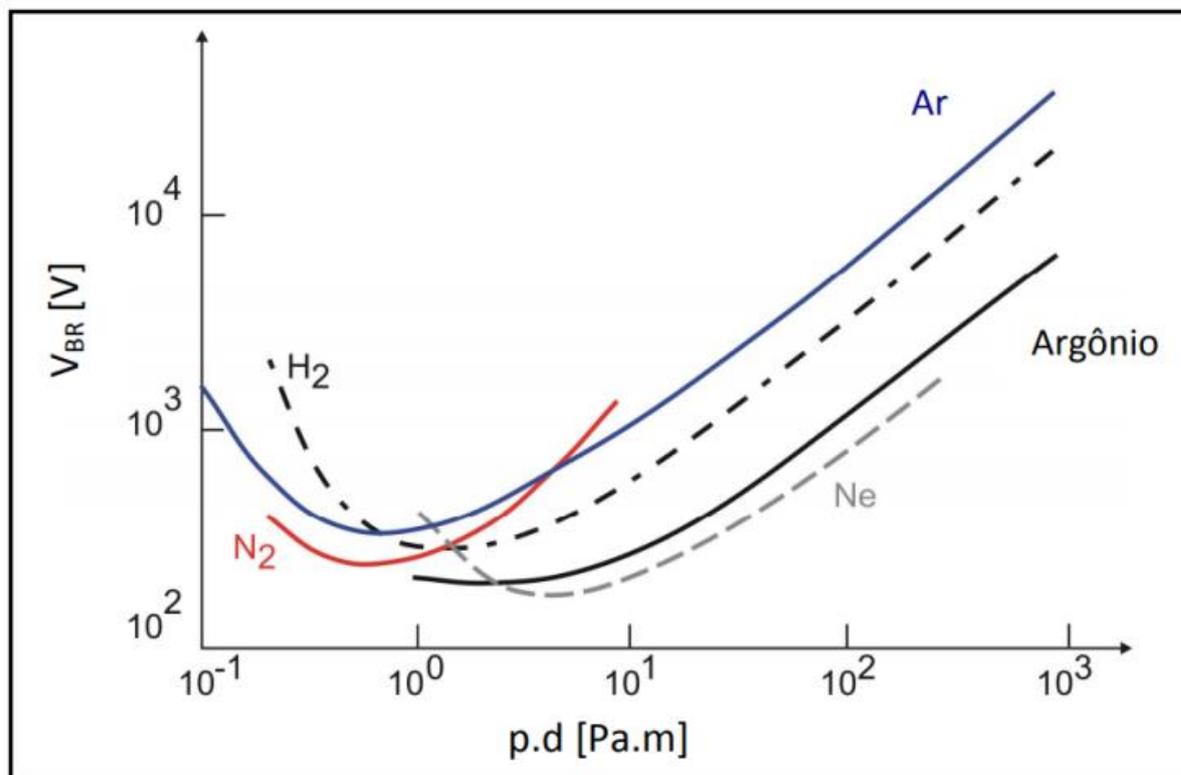
¹¹ Câmaras de ionização são em geral empregadas para medir exposição a raios gama e monitoramento de altos fluxos de radiação.

¹² O gráfico é ilustrativo e não significa que nessa região proporcional o sinal aumente linearmente com a tensão.

¹³ Em razão do gradiente de potencial, um elétron livre é acelerado e, caso ganhe velocidade suficiente ao colidir com um átomo, este átomo pode perder um elétron e se tornar um íon. Em continuidade desse processo, vários elétrons livres e íons são produzidos e, ao se atingir uma quantidade suficiente, o ar (gás), que é isolante, passa a ser condutor, ocorrendo uma descarga entre os eletrodos. O primeiro elétron livre que dá início ao processo pode ser gerado inclusive por radiação cósmica ou por fotoionização.

¹⁴ Conforme a Lei de Paschen, que determina as tensões necessárias para a quebra de rigidez dielétrica (NASSER, 1971).

Figura 4– Curvas de Pashen de alguns meios gasosos.



Fonte: Nasser (1971).

Conforme Nasser (1971), ao potencial em quilovolts de quebra de rigidez dielétrica no ar, e restrito à região linear após a curvatura onde a equação é uma reta, vale empregar:

$$V_{BR} = 30.p.d + 1,35 \quad [\text{kV}] \quad (\text{Equação 1})$$

Por meio das curvas de Pashen (Figura 4) é possível avaliar, caso mantida uma intensidade do campo elétrico por determinada tensão e se a pressão do meio gasoso estiver relativamente alta, que o livre caminho médio será pequeno e que os elétrons não adquirem a energia cinética necessária para provocarem ionizações ao colidirem com moléculas. Por outro lado, se com esse campo a pressão for relativamente baixa, as moléculas estarão tão distantes entre si que, mesmo havendo elétrons com energias suficientes para efetuarem ionizações, poucas colisões ocorrerão. Em ambos os casos, não haverá quebra da rigidez dielétrica do meio. Para ocorrer essa situação, há a necessidade de tais colisões gerarem elétrons livres, que passam também a sofrer a ação também do campo elétrico, acelerar e a colidir entre si, assim como e com as moléculas e íons do meio gasoso. (ibid.).

PROTÓTIPO DETECTOR DE FAÍSCAS COM ARDUINO

Antes de tudo, cabe ressaltar que os materiais utilizados neste projeto podem variar de acordo com a criatividade de quem o montará, considerada as possibilidades de melhorias, como a filtragem de ruídos gerados pelas faíscas, dependendo do conhecimento de eletrônica existente. A proposta foi tornar este protótipo o mais simples e funcional possível, de modo que possa ser construído com o manuseio de ferramentas básicas. Os materiais utilizados em cada parte do protótipo são descritos a seguir. **Detector:** Circuito gerador de alta tensão de uma raquete mata-mosquito 3KV), resistor de $2M\Omega$, cerca de 15 cm de cano de PVC marrom

de ½ polegada, tampa de cano PVC (CAP), cilindro de tecnil de diâmetro ligeiramente menor que o cano de PVC, fio de cobre fino sem isolamento, fios tipo cabinho, bateria ou fonte de carregador de celular, chapa metálica de alumínio, barra rosqueada, porcas e arruelas. **Contador:** Placa Arduino, botão tátil, botões interruptores, bateria, fios, display LCD 1602 com interface I2C e sensor optoacoplador.

O diagrama de montagem do detector de faíscas é indicado na Figura 5A, tendo-se na Figura 5B uma foto dessa montagem. Esse dispositivo, de geometria fio-plana, é basicamente constituído de fios de cobre paralelos¹⁵ sobre uma superfície plana e condutora, que no caso é um pequeno disco de alumínio colado numa extremidade de um cilindro de tecnil (Figura 5F). A diferença de potencial é estabelecida entre esses fios e o disco, que possuem uma regulagem da distância por adaptação longitudinal de uma barra rosqueada pelo centro desse cilindro sobressaindo parte da rosca na extremidade que é oposta à do disco. Nessa adaptação, há uma tampa de PVC (Cap) adicionada na barra rosqueada, incluindo duas arruelas, duas porcas e uma chave de aperto¹⁶ (Figura 5C), de modo a permitir um avanço ou recuo do disco em direção aos fios de cobre que se encontram soldados na placa ora colada num tubo de PVC (Figura 5E), que então é encaixado na tampa (Cap) (Figura 5B). Cabe mencionar que o cilindro de tecnil contém um sulco na lateral e um pino no cano para impedir sua rotação, em que a barra permanece rosqueada na porca do cilindro (Figura 5C). Ao iniciar o faiscamento por aproximação do disco aos fios, gira-se o knob lentamente no sentido oposto até que cessem as faíscas, deixando o sistema na iminência de geração das faíscas. Uma montagem equivalente, com outros materiais e usando um circuito de alta tensão com *flyback* pode ser também visto em Dierka e Bastos (2016).

O circuito de alta tensão da raquete precisa da inserção de um resistor em série com a saída e a substituição do capacitor de alta tensão por um de baixa capacitância (<1nF). Com isso, pode-se conectar este circuito à uma bateria ou fonte de carregador de celular e aos fios do detector feito com o cano de PVC. A Figura 5 apresenta um esquema da montagem e fotos das etapas de montagem.

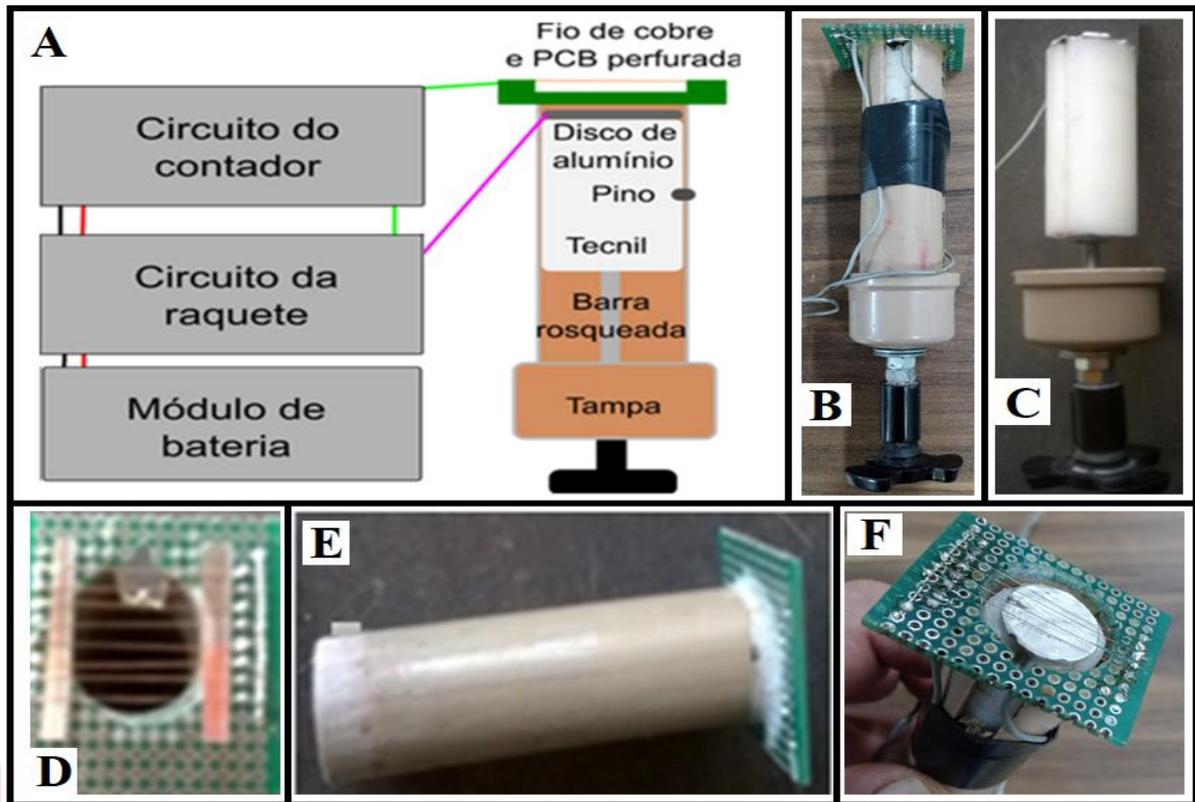
Nessa montagem do contador de faíscas foi utilizada uma porta da placa Arduino para medir a mudança de tensão gerada. Neste caso, a detecção das faíscas é realizada por um sensor optoacoplador. Esse sensor é composto por um LED interno que é acessado por variações de tensão, ou seja, quando são produzidas faíscas. Desta forma, pode-se utilizá-lo para isolar a malha de alta tensão do circuito, pois, para esta montagem, o resistor de 2MΩ limita a corrente para menos de 1 mA.

A Figura 6 apresenta os componentes do circuito elétrico do detector de faísca. Ele é constituído de uma fonte de alta tensão (circuito de raquete mata moscas), uma fonte de alimentação de 5V, uma placa Arduino acoplada a um display 1602 I2C, e um circuito isolador de sinal com optoacoplador. O aterramento da malha primária da fonte de alta tensão e a placa Arduino são alimentados pela mesma fonte de energia, portanto, compartilham o aterramento. Para evitar danos aos componentes eletrônicos sensíveis, o circuito é isolado da malha secundária da fonte de alta tensão utilizando o isolador de sinal com optoacoplador.

¹⁵ Pode-se notar a Figura 5D, a adaptação de uma placa de circuito impresso perfurada na qual se soldou os fios de cobre dispostos em paralelo e conectados entre si. É possível notar que a placa possui um furo central por onde atravessa o cilindro de tecnil que apresenta o disco na extremidade.

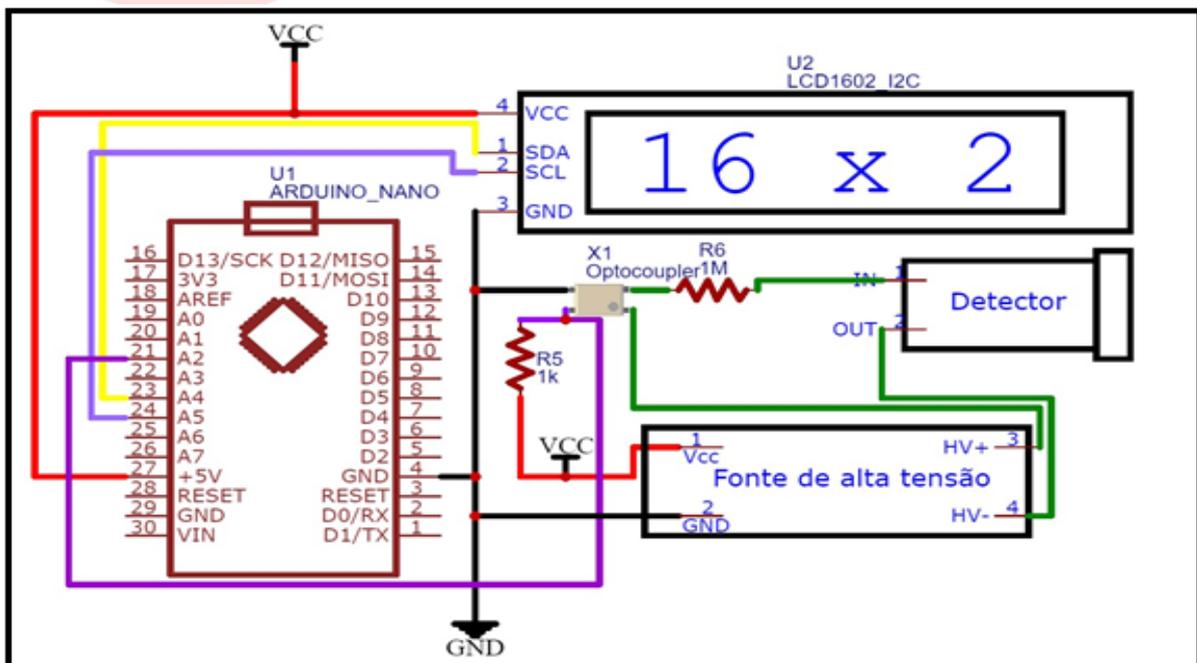
¹⁶ Knob de regulagem do faiscador, aproximando-se, no caso, em sentido anti-horário para obtenção de faiscamento.

Figura 5: A) Diagrama de montagem do detector de faísca; B) Foto da montagem completa do dispositivo. As restantes C), D), E) e F) representam fotos das partes do detector então explicadas no texto.



Fonte: Elaborado pelos autores.

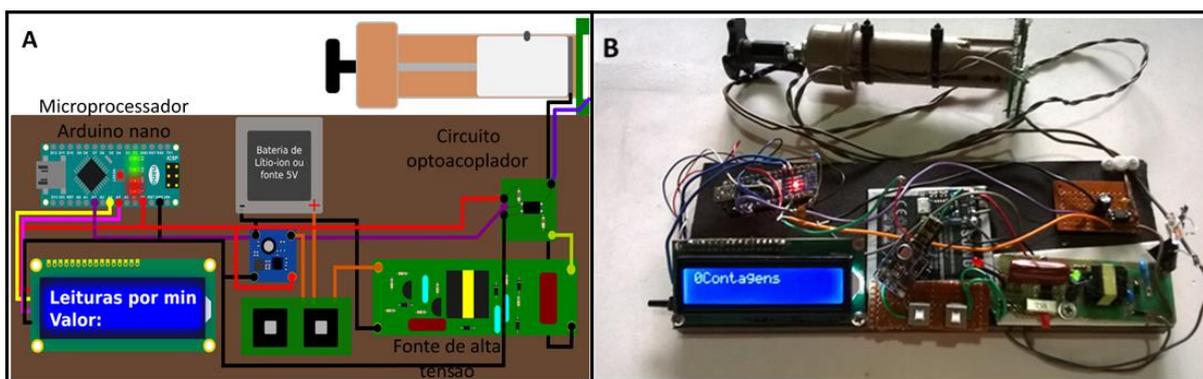
Figura 6 – Esquema elétrico de montagem do protótipo.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Por sua vez, o optoacoplador possui uma montagem DIP (*Duo In-line Package*) de 4 pinos. O par de pinos do lado esquerdo (lado do ponto de referência) estão conectados ao ânodo e cátodo de um LED, e o outro par está conectado ao foto-transistor envolvido pelo chip. O foto-transistor é acionado quando uma corrente flui pelo LED, transmitindo um sinal de um lado do circuito para o outro lado sem contato elétrico. O optoacoplador, por conseguinte, utiliza a luz para acoplar dois circuitos que operam em tensões ou níveis terra diferentes. A Figura 7 mostra o esquema completo da montagem, o diagrama do contador e uma foto do protótipo.

Figura 7. Diagrama completo (A) e foto do protótipo (B).



Fonte: Elaborado pelos autores.

Basicamente, a placa Arduino é um dispositivo com uma plataforma de desenvolvimento aberta utilizada para operação de sensores, controle eletrônico, automação e outras modalidades. Existem inúmeros modelos de placas Arduino compatíveis com esta plataforma. Estes microcontroladores já prontos para uso com a placa contém um circuito oscilador, regulador de tensão e portas embutidas. Junto a esses elementos, podem ser conectados sensores e módulos adicionais. Os microcontroladores básicos possuem uma CPU (unidade de processamento central), uma RAM (memória de acesso aleatório) e uma memória flash (memória programável). Os microcontroladores Arduino possuem também uma EEPROM (memória de apenas leitura eletricamente apagável), conjunto de relógios para PWM, I/O (entradas e saídas digitais) com corrente amplificada, ADC (Conversor de analógico para digital), etc. A maioria destes ICs precisam de um oscilador externo para operar, o que permite uma mudança na frequência de operação para melhor desempenho ou economia de energia.

Neste trabalho foi utilizada a placa Arduino Nano V3 com o microcontrolador IC ATMEGA328P com frequência de 16MHZ, 14 pinos digitais (dos quais 6 PWM) e 8 analógicos. A função exercida na montagem é a de detecção e contagem de faíscas que ocorrem no faiscador. Com o módulo de display LCD 1602 é possível observar os valores de contagens por minuto e enviar para o computador pelo barramento serial. Um dos problemas é que a alta tensão do faiscador dificulta a medição direta da tensão, pois a placa Arduino suporta 5 volts. Outro problema é o ruído elétrico produzido pela fonte de alta tensão, que gera interferência no microcontrolador. Para contornar esses problemas, construiu-se um circuito de detecção utilizando um optoacoplador para reduzir a tensão do sinal e ruídos. A presente montagem usa um sinal normalmente alto (5 volts) e, quando ocorre uma faísca, a tensão de saída do circuito diminui em um pulso negativo e retorna rapidamente para seu estado de 5 volts. Ao utilizar a função "*digitalPinToInterrupt*" para detectar a queda na tensão e contar quantas vezes ocorre por minuto, envia-se o valor para o display e porta serial, caso se esteja usando um computador.

PROPOSTA EDUCACIONAL DEMONSTRATIVA SEM FONTE RADIOATIVA E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O protótipo aqui desenvolvido foi inicialmente testado, de modo qualitativo e sem quaisquer calibrações, para a detecção da radiação ionizante de partículas alfa de uma fonte de Amerício-241, sem colimador, e que pertence *ao Laboratório de Pesquisa e Instrumentação em Ensino de Física*¹⁷ (Instalação então autorizada pela CNEN com registro da referida fonte). A atividade estimada da fonte está em 32,1 kBq, cerca de três vezes o valor limite de isenção indicado pela CNEN de 10000 Bq de atividade para Am-241 (CNEN, 2011, p. 9)¹⁸. Tal fonte exige procedimentos de proteção radiológica conforme Posição Regulatória 3.01/001:2001 da CNEN. Fontes similares a esta são encontradas em detectores de fumaça do tipo iônico e não se incluem nos critérios de exclusão, isenção e dispensa de requisitos de proteção radiológica (CNEN, 2011, p. 9)¹⁹. No caso, cabe comentar que em território nacional houve a suspensão de autorização para a fabricação e instalação de detectores de fumaça e para-raios radioativos²⁰. Portanto, embora aqui seja mencionado o uso dessa fonte para fins de detecção da partícula alfa, mais adiante sugere-se sua substituição pelo uso de outro procedimento para o professor interessado em demonstrar o fenômeno numa simulação equivalente com soprador ou secador de cabelo.

Com o protótipo em mãos, ao se diminuir a distância entre os terminais cátodo e ânodo em que se estabelece a diferença de potencial de cerca de 3000 V, mediante pressão atmosférica se pode estimar próxima de 1 atm (101325 Pa), observa-se experimentalmente que a descarga elétrica²¹ ocorre por volta de 1 mm (0,001 m). Esse resultado experimental coincide com a previsão feita pela equação 1 ao se adotar esses valores²²:

$$d = (V_{BR} - 1,35) / 30 \cdot p = 3000 - 1,35 / 30 \cdot 101325 \cong 0,98 \text{ mm. (Equação 1)}$$

Obviamente, o mesmo resultado pode ser visualizado através do gráfico das curvas de Pashen na Figura 4. Para o valor de distância entre eletrodos igual a 1 mm, o produto da pressão p por esta distância d é de aproximadamente $10^5 \text{ Pa} \times 10^{-3} \text{ m}$ ou 10^2 Pa.m . Observando o gráfico, esse valor de $p \cdot d$ nos leva a uma tensão de ruptura da rigidez dielétrica do ar de cerca de 3000 V.

Conseqüentemente, na condição de distanciamento dos terminais por um pouco além de 1 mm, não haverá quebra da rigidez dielétrica do ar e nenhuma descarga surgirá entre eles. Ocorre que, nessa condição limite de iminência da faísca, ao se aproximar por alguns centímetros dessa região a fonte de Am-241, a radiação alfa emitida intensifica a ionização local e a descarga pode então acontecer para potenciais mais baixos ou, especificamente no caso, para essa distância inicial ligeiramente maior entre os terminais. Essa situação permite ao protótipo realizar algumas contagens por descargas a partir das ionizações produzidas pela radiação incidente. Uma tradicional e simples demonstração, comprovada experimentalmente,

¹⁷ Depto de Física da Universidade Estadual de Londrina (UEL-PR).

¹⁸ Em que um dos autores do trabalho é o responsável pela fonte, credenciado junto à CNEN à proteção radiológica da mesma.

¹⁹ O que não significa que para fontes radioativas abaixo de níveis de isenção não necessitem de conhecimentos sobre como proceder com elas de forma segura.

²⁰ <<https://ien.gov.br/index.php/banco-de-noticias/114-para-raios-e-detectores-de-fumaca.html>>. Último acesso: 27 de novembro de 2019.

²¹ Nota-se uma faísca elétrica. Cabe ressaltar que essa transição abrupta do meio gasoso (ar atmosférico no caso) isolante para condutor, entendida como quebra da rigidez dielétrica do meio ou *breakdown*, não caracteriza o surgimento da faísca. Breakdown e faísca são fenômenos distintos, mas só pode haver faísca na presença de *breakdown*. (NASCER, 1971).

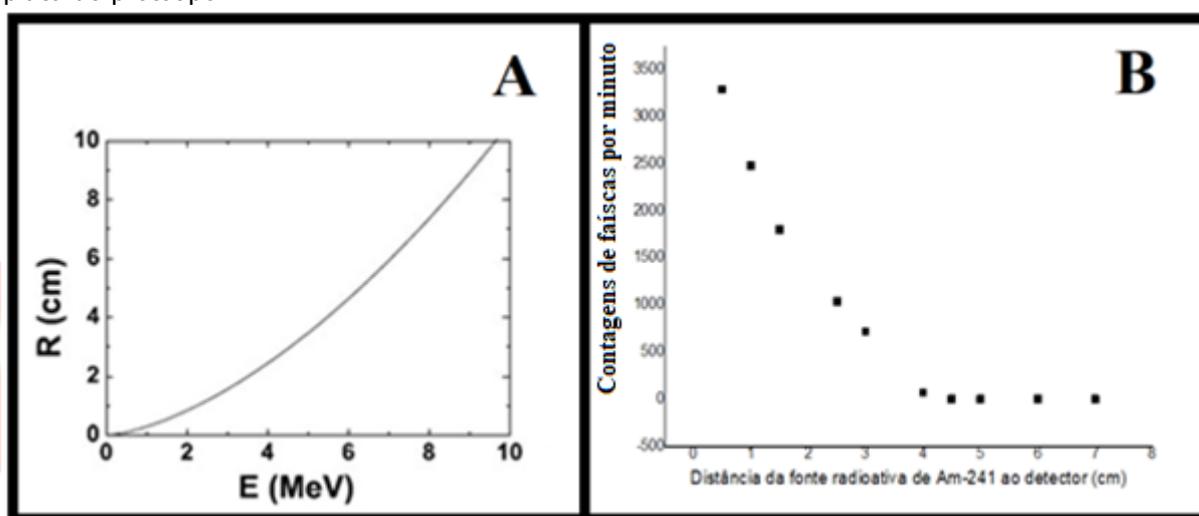
²² Situação em que o valor do produto $p \cdot d$ se encontra na região linear à direita do gráfico da Figura 7.

foi a do alcance da partícula alfa no ar, cujo resultado é apresentado na Figura 8 para confrontação com o valor teórico calculado. O alcance médio (em centímetros) de uma partícula alfa (em condições normais), com energia entre 4 e 10 MeV, é dado pela equação 2 (MAFRA, 1973):

$$R = (0,005 E + 0,285) E^{3/2} \quad (\text{Equação 2}),$$

Tendo em conta a energia das partículas alfa do Am-241, em sua maioria de 5,49 MeV, obtém-se um valor de alcance R próximo de 4 cm no ar, resultado coerente com o gráfico da Figura 8A. Na Figura 8B são exibidos os resultados experimentais, que comprovam uma contagem de faíscas sendo iniciada por volta de 4 cm. O aumento das contagens torna-se gradativo quando da aproximação da fonte junto à região fio-placa do protótipo.

Figura 8 – A) Alcance de partículas alfa no ar em função da energia das mesmas. B) Gráfico de contagens de faíscas conforme proximidade da fonte de Am-241 com a região fio-placa do protótipo.



Fonte: A) Fonseca et al. (2010, p. 2305-3). B) Autores.

Na intenção de substituir a demonstração por uma alternativa educacional sem fonte radioativa, propõe-se empregar um soprador de ar, que pode até ser um aspirador de pó com fluxo invertido soprando ar em temperatura ambiente, ou mesmo um secador de cabelo (fluxo de ar com temperatura superior que a do ambiente)²³. Deste modo, no lugar de provocar ionizações entre a região fio-placa por meio de partículas alfa para que as descargas elétricas ocorram com diferenças de potenciais ligeiramente inferiores à situação de ruptura (V_{BR}), o soprador de ar direcionado na região fio-placa diminuirá ali a pressão e, com isso, permitir a ocorrências das descargas elétricas necessárias para as contagens. Nessa proposta experimental, sugere-se testar isso fazendo-se aproximações graduais do soprador na direção da região fio-placa do protótipo. Conforme a corrente de ar aumenta entre a pequena região dos fios com a placa, a pressão do ar diminui nesse espaço em comparação com a pressão do ar parado. Esse fenômeno de diminuição da pressão em razão do aumento da velocidade do ar fundamenta-se no princípio de Bernoulli.

Conforme a Equação 1, para o caso do intervalo linear à direita no gráfico da Figura 4, e estando uma vez mantida a distância d entre a região fio-placa com uma diferença de potencial (V) pouco inferior ao valor de ruptura (V_{BR}), a diminuição de pressão p ocasionada

²³ Pode-se até usar uma vela para que o fluxo de ar quente acione as contagens no momento em que se posiciona o protótipo na vertical até cerca de 30 cm acima da vela.

pela velocidade do ar na região permite que a descarga possa logo ocorrer para diferenças de potenciais mais baixas. Isto não ocorre com a pressão do ar em repouso. Tal procedimento viabiliza as contagens das faíscas observadas no display do protótipo sem o emprego de partículas alfa no local.

Consequentemente, para se ajustar as condições do gráfico da Figura 8B a partir da presente proposta, sugere-se estabelecer um fluxo de ar e, gradativamente, aproximar o soprador da região fio-placa do protótipo para efetuar as contagens de faíscas. A Figura 9 apresenta um secador de cabelo empregado na atividade experimental para tais contagens.

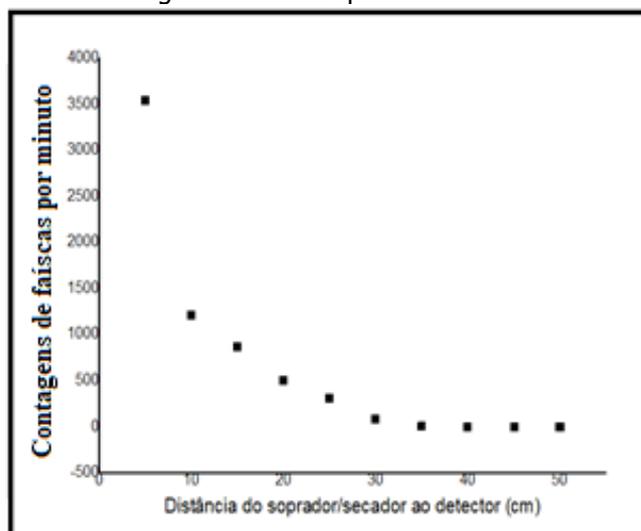
Figura 9 – Atividade experimental sugerida para o professor do ensino médio, ilustrando uma realização de contagens por minuto pelo protótipo ao se empregar um secador de cabelo.



Fonte: Elaborado pelos autores.

A Figura 10 apresenta um gráfico dos resultados com o secador de cabelo (Figura 9), e que pode ser comparado com o gráfico da Figura 8B (fonte de Am-241). Do ponto de vista didático, pode-se inferir que o comportamento das curvas é semelhante. Quanto mais distante do detector, menor a contagem, indicando que a ação da "fonte de vento" tem efeito semelhante à fonte radioativa sobre o detector de faíscas tipo fio-placa.

Figura 10 – Gráfico das contagens de faíscas por minuto com um secador de cabelo.



Fonte: Elaborado pelos autores.

Para as mesmas condições de pressão, temperatura e umidade, o alcance da partícula alfa no ar é constante para a mesma energia. Uma vez que o detector é colocado a uma distância igual ou menor ao alcance das partículas provenientes da fonte, o esperado seria que o número de contagens fosse o mesmo para este tipo de detector. Isto porque o aumento do número de contagens observado está associado ao fato da fonte não estar colimada. Quando a fonte é aproximada do detector, amplia-se o ângulo sólido de detecção, aumentando assim o número de detecções. É interessante observar que o ângulo sólido diminui linearmente com o afastamento da fonte ($\Omega = 2p(1-\cos\theta) = 2p(1-d/R)$, sendo d é a distância da fonte ao detector, e R é o alcance da partícula alfa). Os dados mostrados no gráfico da Figura 8B corroboram com essa linearidade entre o número de detecções e a distância entre a fonte e o detector.

Por outro lado, com o secador de cabelo (Figura 10), é possível reproduzir a variação no número de contagens alterando a pressão do ar entre o ânodo e o cátodo do detector (região fio-placa). A pressão diminui com o aumento da velocidade do fluxo de ar, e a velocidade varia com a distância ao detector. Aproximando-se o secador de cabelo, a velocidade do fluxo de ar no detector aumenta, reduzindo-se a pressão. É interessante notar que a variação do número de contagens neste caso não apresenta aspecto linear (Figura 10). A explicação para isso é que a pressão do ar decresce com o quadrado da velocidade, e esta cai com o inverso do ângulo sólido de detecção. Assim, a variação da segunda curva mais se assemelha com uma diminuição com o inverso do quadrado da distância, enquanto a primeira tem um comportamento mais próximo da linearidade.

Esses resultados favorecem para que essa demonstração se conforme para o Ensino Médio. Com isso, o professor é capaz de promover um paralelo com a demonstração que utiliza fonte radioativa. A partir desse arranjo experimental, ele tem a oportunidade de discutir os princípios físicos de funcionamento de um detector de faíscas para partículas alfa oriundas do decaimento de fontes radioativas, bem como detalhar a operação de distintos detectores a gás (ou ar).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho buscou contribuir com uma proposta de montagem de um protótipo detector de faísca de custo reduzido combinado com um dispositivo Arduino para realizar a contagem das descargas elétricas (sem calibrações). A proposta é uma alternativa conveniente para ser usada na escola do Ensino Médio por eliminar a necessidade de uma fonte radioativa para demonstrar o funcionamento do detector de faíscas. Nesse contexto, porém, as demais propostas encontradas na literatura tornaram-se impraticáveis, senão ilegais, por envolvem uso de fontes radioativas.

Enfim, diante do colocado, espera-se que a distinta e inovadora situação experimental de substituir uma fonte radioativa por um soprador ou secador de cabelo possa convidar, de modo seguro e sem complicadas burocracias envolvidas com emprego legal de fontes radioativas, aqueles professores interessados em inserir esse tipo de assunto nos seus conteúdos regulares desenvolvidos ou mesmo nas feiras de ciências promovidas nas escolas.

REFERÊNCIAS

BARTINIKAS, R. Partial Discharges Their Mechanis, Detection and Meassurement. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 9, n. 5, p. 763-808, (oct) 2002.

CHANG, W. V.; RESENBLUM, S. A Simple Counting System for Alpha Ray Spectra and the Energy Distribution of Po Alpha Particles. **Phys. Rev.**, 67: 227-7, 1945. Disponível em:

<<https://journals.aps.org/pr/pdf/10.1103/PhysRev.67.222>>. Último acesso: 6 de fevereiro de 2020.

CNEN. **Critérios de exclusão, isenção e dispensa de requisitos de proteção radiológica.** Posição Regulatória – 3.01/001: 2011 (2011). Disponível em: http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/pr301_01.pdf. Último acesso: 15 de junho de 2016.

DIERKA, T.; BASTOS, R. O. **Montagem de um detector de radiação alfa por faísca elétrica para o ensino.** In: SIMPÓSIO NACIONAL DE ENSINO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA, IV, Ponta Grossa – PR, 2016. Disponível em: <<file:///C:/Users/Usuario/Downloads/01469384592.pdf>>. Último acesso: 23 de novembro de 2019.

FILHO HEILBRON, L. F. P.; XAVIER, A. M.; PONTEDEIRO, E. M.; FERREIRA, R. S. **Segurança Nuclear e Proteção do Meio Ambiente.** Rio de Janeiro: E-papers Serviços Editoriais Ltda, 2004. Disponível em: https://books.google.com.br/books?id=TEqwbv8MlcC&pg=PA241&lpg=PA241&dq=Cadeia+completa+de+decaimento+do+Am-241&source=bl&ots=ygs3_xeljK&sig=FGPt2N38Z_374ol3AwjN76sTmUA&hl=pt-BR&sa=X&ved=0ahUKEwihqcbWjpvNAhUHhpAKHZW_DXEQ6AEIJDAB#v=onepage&q=Cadeia%20completa%20de%20decaimento%20do%20Am-241&f=false. Último acesso: 09 de junho de 2016.

FONSECA, P.; ZAMORANO, A.; LUNA, H.; SANTOS, A. C. F. Estudo do poder de frenamento de partículas alfa na matéria. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 32, n. 2, 2305, 2010. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbef/v32n2/v32n2a05.pdf>>. Último acesso: 23 de novembro de 2019.

GONÇALVES, J. A. C. **Pesquisas, propriedades e aplicações de detectores de faísca em problemas de física nuclear e de energia atômica.** Tese apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Doutor em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear. IPEN, São Paulo, 1993.

GREINACHER, H. "Über Einen Hydraulischen Zähler für Elementarstrahlen". **Hely Phys. Acta**, v. 7, p. 360, 1934.

KNOLL, G. R. **Nuclear Radiation Detection.** 2ª Edição. John Wiley & Sons: Nova York, 1988.

MCRBERTS, M. **Arduino básico.** 2ª edição. São Paulo: Novatec Editora (2015).

NASSER, E. **Fundamentals of Gaseous Ionization and Plasma Electronics.** New York: John Wiley & Sons, 1971.

MAFRA, O.Y. **Técnicas e Medidas Nucleares.** São Paulo: Blücher, 1973.

SILVA, O. H. M.; COSTA, N.; SILVA, P. R. C.; LOPES, F. Subsídios para emprego de fontes radioativas aos fins educacionais: reflexões a partir de eletrodos de tungstênio contendo tório. **Revista Ciências & Ideias**, v. 13, n. 1, p. 79-88, janeiro/março, 2022. Disponível em: <<https://revistascientificas.ifrj.edu.br/revista/index.php/reci/article/view/1923>>. Último acesso: 5 de agosto de 2022.

APÊNDICE

/*Este código foi escrito para utilizar uma placa Attiny85 e não foi escrito por um profissional de programação.

*Pode-se alterar os valores dos pinos de acordo com sua montagem, levando em conta as funcionalidades necessárias.

*Foram utilizadas variáveis com nome em inglês para evitar a utilização de palavras com caracteres proibidos.

*/

```
#include <LiquidCrystal_I2C.h>    //inclui biblioteca para o display com interface serial
#include <Wire.h>                //Inclui biblioteca I2C para o a interface do display

#define reset_counter PB1        //define o pino para o botão que zera a contagem
#define sensor_pin PB3          //define o pino de entrada para o sensor de faísca **Pino
com ADC**

uint32_t count = 0, lastcount = 0; //variáveis para valor de contagem e última contagem
uint8_t change = 1;             //variável para atualização do display
unsigned long time_min = 0;      //variável para contar os minutos
unsigned long lastTime = 0;      ///variável para lembrar do último tempo registrado
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,16,02); //Define endereço lógico do display e dimensões em
caracteres **endereços mais comuns: 0x27 e 0x3f**

void setup() {
  pinMode(sensor_pin, INPUT);    //ativa o pino do sensor como entrada
  pinMode(reset_counter, INPUT_PULLUP); //ativa o resistor interno do pino de zerar o
  contador
  Wire.begin();                 //inicia a conexão wire
  lcd.init();                   //inicia o display
  lcd.setBacklight(HIGH);       //Acende a luz de fundo do display
  lcd.clear();                  //limpa o display e retorna o cursor para o início
  lcd.print("Contagens: ");
}

void loop() {

if(change == 1){
```

//se precisar atualizar o valor no lcd, sobrescreve com espaços o valor presente no lcd, escreve o novo valor e desativa a variável atualização do display

```
lcd.setCursor(10,0);  
lcd.print("  ");  
lcd.setCursor(10,0);  
lcd.print(count);  
change = 0;  
}
```

```
do {
```

```
if(analogRead(sensor_pin) < 600){  
  //se detectar uma faísca o número de contagens aumenta  
  count++;  
}
```

```
if (digitalRead(reset_counter) == 0){  
  //ao detectar o botão de zerar pressionado, zera as variáveis de contagem e ativa a  
  atualização do display  
  count = 0;  
  change = 1;  
}
```

```
} while(millis()/60000 < time_min);
```

//Enquanto o tempo decorrido for menor que 60000ms (1 minuto) o sistema acumulará a contagem

```
if (count != lastcount){  
  //detecta variação da contagem  
  change = 1;  
}
```

```
lastcount = count; //define o valor para a última contagem
```

```
time_min++; //aumenta o tempo de referência
```