



DESENVOLVIMENTO E CALIBRAÇÃO DE SISTEMAS DE DETECÇÃO DE RADIAÇÃO GAMA E NÊUTRONS NA UTILIZAÇÃO DE CINTILADORES LiI (Eu)

Kennedy C. S. Corrêa¹, Arno H. de Oliveira¹, Maria A. F. Veloso¹

¹Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Nuclear.
Av. Antônio Carlos, 6627, Prédio Escola de Engenharia - PCA 1 - Campus Pampulha.
kennedycarlosc@ufmg.br, heeren@nuclear.ufmg.br, dora@nuclear.ufmg.br

Palavras-Chave: Cintiladores; Radiação Gama e Nêutrons; Radioisótopos

RESUMO

Os materiais cintiladores são materiais caracterizados pela intensidade do pulso de luz, pelo espectro de energia, pelo tempo de decaimento dos pulsos e pela atenuação da luz no interior dos cintiladores. Esses materiais podem ser constituídos por plásticos, vidros ou por cristais, em que os cristais, geralmente higroscópicos, produzem mais fótons. Entre os cintiladores mais conhecidos estão o Iodeto de Lítio-6 ativado por Európio (LiI (Eu)). Devido à sua alta sensibilidade, o LiI (Eu) é utilizado na detecção de radiação gama e de nêutrons. Esses cintiladores são robustos e resistentes a produtos químicos, exceto o ácido fluorídrico, e diferente dos densímetros convencionais, estes sistemas de detecção separam o conjunto cintilador e fonte radioativa do módulo eletrônico de aquisição de dados por um guia de luz. Os sistemas compostos pelo cristal cintilador (LiI (Eu)) e sua eletrônica associada, acoplados a um guia de luz, que transmite o sinal para um módulo digitalizador de pulsos de luz, transformando-os em pulsos elétricos digitalizados, permitem a detecção da radiação gama e de nêutrons. Para o primeiro sistema, utilizará uma fonte gama de Amerício-241, com energia de 59,7 keV, e no outro, uma fonte de nêutrons de ²⁴¹Am-Be, com energia média de 3,5 MeV. Isso permite que estejam a grandes distâncias com pequenas perdas do pulso de luz, ampliando suas aplicações tecnológicas em diferentes setores. A moderação de nêutrons é feita com material hidrogenado (colisões elásticas), pois o LiI (Eu) possui alta eficiência na detecção de nêutrons térmicos (0,025 eV) com uma seção de choque de absorção elevada (941 barns). Os nêutrons são detectados pela reação nuclear ${}^6\text{Li} + n^1 \rightarrow {}^4\text{He} + {}^3\text{H} + 4,78 \text{ MeV}$. Adicionalmente, também é utilizado um diodo emissor de luz (LED) vermelho difuso de 5 mm, com comprimento de onda em 648 nm, para testes de calibração com o módulo digitalizador associado ao sistema. O LED que permitiu verificar a eficiência do módulo em condições controladas, simula os pulsos de luz gerados pelos cintiladores. Para este trabalho, realizou-se testes utilizando o cristal cintilador (LiI (Eu)) para ajustar os parâmetros de ganho e resposta temporal do módulo digitalizador, de maneira a garantir a precisão e a confiabilidade das medições da radiação gama e dos nêutrons nos diferentes sistemas envolvidos. A inclusão de um LED vermelho nos testes, foi uma ferramenta eficiente para otimização do desempenho do sistema de detecção, contribuindo para avanços nas suas aplicações tecnológicas.

1. INTRODUÇÃO

Por volta de 1930 e 1931 na Alemanha e França, estudos viam sendo feitos pelos pesquisadores Bothe e Becker e pelo casal Joliot-Curie, sobre a natureza de uma radiação penetrante, advinda do bombardeamento de partículas α (alfa) do elemento polônio em alvos de materiais leves. Descobriram que se tratava de radiação γ (gama) com energia de alguns MeV. Porém, o caráter dessa radiação γ não era conhecido, vindo do alvo de berílio, pois a sua energia deveria ser da ordem de 50 MeV. Mais tarde, foi comprovado experimentalmente que esta radiação era uma



partícula sem carga e com massa comparável à do próton, sendo então um nêutron assim como proposto por Rutherford em 1912 [1].

A maioria dos materiais possuem uma propriedade de emissão de luz em consequência da absorção de energia. Uma vez que, um átomo perca elétrons e fique em estado excitado, para o processo de retorno a um estado estável é necessário haver uma emissão de luz. Para os detectores cintiladores, essa emissão de luz é o que permite a detecção de partículas ionizantes. A efetividade dos detectores cintiladores só foi possível em função de avanços no desenvolvimento de dispositivos fotoelétricos, os quais tornaram possível amplificar a luminosidade produzida pelo cintilador e ainda convertê-la em sinais elétricos passíveis de serem contabilizados em conjunto com a associação de instrumentos eletrônicos apropriados. Tais cintiladores são utilizados não somente para a detecção de radiação, mas também na medição de energia da radiação, principalmente para raios gama. As características ideais de um bom cintilador se daria pela conversão de toda a energia depositada em seu meio em luz detectável, sendo assim, o material precisa ser transparente no comprimento de onda em que produz cintilação, ter baixo índice de refração e possuir fácil obtenção em variadas configurações geométricas [2, 3, 4]. Neste contexto, apenas dois materiais orgânicos são empregados como detectores cintiladores, o antraceno ($C_{14}H_{10}$) e o estilbeno ($C_{14}H_{12}$), sendo a mais tempo utilizados e que possuem maior eficiência dos materiais orgânicos. Porém, estes materiais possuem baixa resistência mecânica e são de difícil obtenção em grandes dimensões [5].

Cristais cintiladores inorgânicos, como o ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$, são amplamente reconhecidos na detecção de radiação devido à sua alta densidade, eficiência de cintilação e excelente resolução energética. O lítio presente no ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$ possui uma seção de choque significativa para a captura de nêutrons térmicos, o que resulta em uma emissão luminosa intensa quando o cristal é excitado por radiação. A dopagem com európio (Eu) é crucial para otimizar a eficiência da cintilação, pois este elemento aumenta tanto o rendimento luminoso quanto a estabilidade temporal do cristal, fatores essenciais para a precisão e qualidade dos dados em aplicações de espectroscopia gama e de nêutrons [6]. Esses cristais desempenham um papel vital em sistemas de detecção onde a conversão precisa da radiação incidente em sinais de luz é imperativa para a obtenção de resultados confiáveis.

Novas aplicações de cintiladores requerem resposta rápida e necessitam de grande seção de choque de absorção para fótons gama de alta energia. Devendo ainda, possuírem alto rendimento de luz, alta estabilidade química à radiação e boa resistência mecânica [3]. Dentre os mais conhecidos que apresentam tais características, destacam-se os cristais de iodeto de sódio ativado com tálio (NaI:Tl) e o iodeto de lítio ativado com európio (${}^6\text{LiI:Eu}$), para detecções de radiação gama e nêutrons térmicos. Assim, neste trabalho foram estudadas as curvas de calibração do sistema de aquisição de dados, utilizando como fonte luminosa um LED difuso vermelho com comprimento de onda de $\lambda = 648 \text{ nm}$, efetuando a obtenção dos dados a uma variação de distância focal de 10 e 20 cm, além da obtenção da medida sem o LED. Especificamente, buscamos otimizar a precisão dos parâmetros de ganho e resposta temporal do módulo digitalizador, além de validar a eficiência do sistema em diferentes condições de medição, utilizando um LED para simular os pulsos de luz gerados pelos cintiladores.

2. METODOLOGIA

A metodologia adotada para elaboração do projeto e desenvolvimento do sistema, com sua eletrônica associada, baseia-se na realização da calibração da fotomultiplicadora utilizando um LED vermelho de $\lambda = 648 \text{ nm}$, que simula os pulsos de luz gerados pelo cristal cintilador ${}^6\text{LiI}(\text{Eu})$. Este método permitiu ajustar os parâmetros de ganho e resposta temporal do módulo



digitalizador de maneira precisa. O LED foi fundamental para garantir a confiabilidade das medições de radiação gama e nêutrons, oferecendo uma forma controlada e repetível de testar o desempenho do sistema. Adicionalmente, foram utilizados materiais hidrogenados para a moderação de nêutrons, juntamente com algumas fontes de Am-241 e $^{241}\text{Am-Be}$ para validação.

2.1 Diodo Emissor de Luz (LED)

Os detectores cintiladores operam convertendo a energia da radiação incidente em luz visível, que é então detectada e convertida em sinais elétricos por dispositivos como fotomultiplicadoras (PMTs) ou fotodiodos [7]. A calibração desses detectores é crucial para garantir que a conversão de energia seja precisa e consistente. LEDs vermelhos difusos, são utilizados como fontes de luz calibradas que emitem luz com comprimentos de onda específicos, geralmente entre 620-750 nm, que podem ser ajustados para simular a resposta do cintilador a diferentes energias de radiação [8]. Oferecendo consistência e precisão; controle e ajustabilidade na intensidade da luz; baixo custo, tornando-os uma solução econômica para calibração e durabilidade e longa vida útil, com boa resistência a choques e vibrações, reduzindo a necessidade de substituições frequentes.

Pesquisas recentes têm focado na melhoria da eficácia dos LEDs vermelhos difusos em calibração de detectores cintiladores. Foi investigada a linearidade de resposta dos LEDs e desenvolvido um método para corrigir os desvios, melhorando a precisão da calibração e no uso de difusores ópticos avançados para garantir a uniformidade da luz, bem como no desenvolvimento de sistemas de controle térmico para estabilizar a emissão de luz dos LEDs. [9-12].

O uso de LEDs em testes de calibração, envolve várias etapas. Inicialmente, o LED é montado de forma a iluminar o detector cintilador uniformemente. Em seguida, a intensidade da luz é ajustada para simular níveis de energia de radiação. Os sinais gerados pelo detector são então comparados com valores esperados para ajustar e validar a resposta pelo detector [8]. A Figura 1, mostra a montagem deste sistema e na Tabela 1, é evidenciado as características Optoelétricas do LED utilizado.

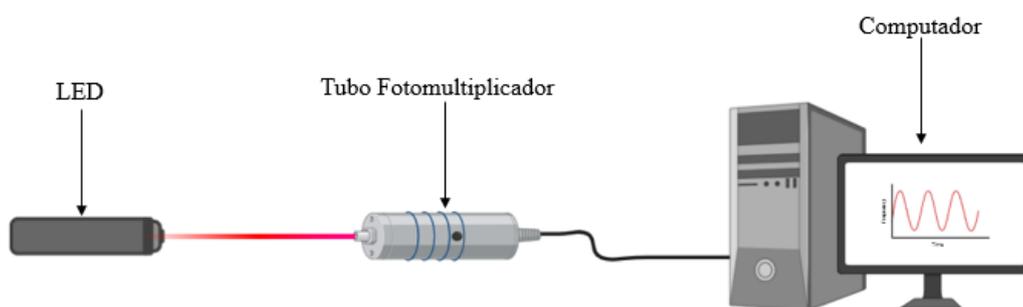


Fig. 1. Esquema da montagem do sistema utilizando um LED vermelho difuso de 648 nm.

Este processo, representa um avanço significativo na precisão e eficiência, com benefícios claros em termos de consistência, custo e durabilidade, tornando-os uma escolha padrão em diversas aplicações científicas e industriais.



Tab. 1. Características Optoelétricas do LED vermelho difuso [13].

Características Optoelétricas	Mín.	Máx.	Unid.
Potência Dissipada		60	mW
Corrente de Pico (1/10 Ciclo, PW ≤ 1 ms)		80	mA
Corrente de Operação		20	mA
Coefficiente de Redução acima de 50° C		0,4	mA/°C
Tensão Reserva		6	V
Temperatura de Operação	- 40	+ 85	°C
Temperatura de Armazenamento	- 40	+ 100	°C
Temperatura de Soldagem (≤ 5 seg a 3 mm da base epóxi)	+ 255	+ 265	°C

3. RESULTADOS

3.1 Funcionamento do Sistema de Detecção

Com uma ampla utilização não somente na detecção de radiação, os cintiladores são usados na medida de radiação e principalmente no estudo das ondas eletromagnéticas. O seu funcionamento se dá pelas cintilações induzidas por radiação em algumas substâncias que possuem essa característica. O material cintilador converte radiação de alta energia em radiação no espectro violeta ou visível, passando por amplificação do sinal em um fotomultiplicador e obtendo um pulso com carga proporcional a energia depositada pela radiação no detector [14]. A Figura 2 mostra o funcionamento do detector cintilador.

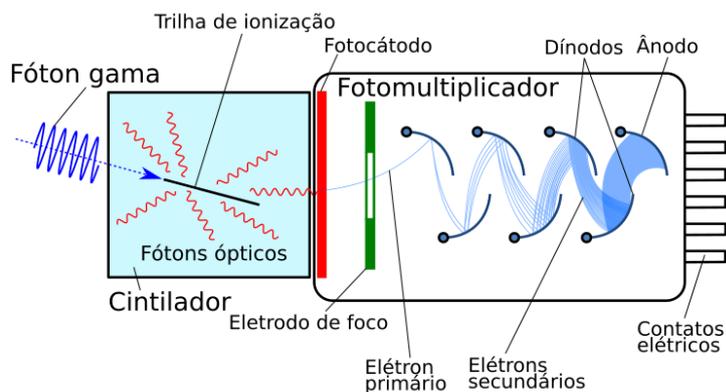


Fig. 2. Esquema do detector cintilador acoplado a um fotomultiplicador. [15]

3.2 Medidas de Fundo em Ambiente Escuro

A Figura 3 apresenta o comportamento do fotomultiplicador operando em um ambiente escuro, sem a presença de uma fonte externa de luz. O experimento foi realizado ao longo de 2000 segundos, com um tempo de 100 ms e alta tensão (HV) aplicada.

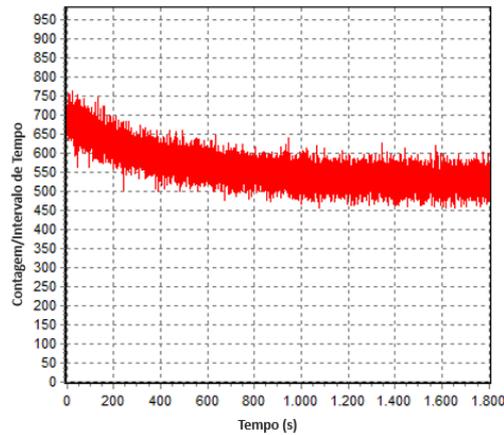


Fig. 3. Gráfico dos dados de contagens obtidos em ambiente escuro.

Observa-se que, nos primeiros 200 segundos, as contagens exibem uma queda exponencial de aproximadamente 750 para 550 contagens por intervalo de tempo. Esse comportamento inicial está relacionado ao processo de estabilização do sistema eletrônico do fotomultiplicador. Após este período, as contagens estabilizam em torno de 500 contagens por intervalo de tempo, o que reflete o nível de ruído de fundo do sistema. Esse ruído de fundo é atribuído principalmente ao ruído térmico inerente ao circuito eletrônico e o próprio fotomultiplicador, o que é consistente com a literatura sobre a operação de dispositivos desse tipo em ambientes de baixa luminosidade. A estabilização do sinal após o início do experimento, indica que o fotomultiplicador alcançou um estado de equilíbrio, registrando o mínimo possível de interferência.

3.3 Medidas Utilizando Luz LED Vermelho Difuso (648 nm)

Na Figura 4 é apresentada as medições realizadas com a fonte de luz LED, posicionada a uma distância de 10 cm do detector. A curva mostra picos regulares de contagem, com máximos atingindo aproximadamente 120.000 contagens por intervalo de tempo. A periodicidade dos picos reflete a pulsação repetitiva da fonte de luz, com uma frequência aproximada de 1 segundo entre os picos.

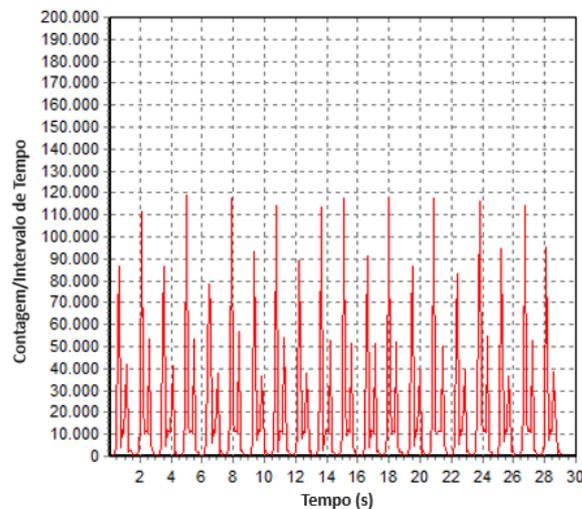


Fig. 4. Gráfico dos dados de contagens por intervalo de tempo, utilizando uma fonte de luz LED vermelha posicionada a 10 cm do detector fotomultiplicador.



A análise deste gráfico indica que a intensidade da luz detectada pelo fotomultiplicador é considerável, com variações de contagens entre 20.000 e 120.000. Este comportamento pode ser atribuído à proximidade do LED em relação ao detector, o que resulta em uma maior quantidade de fótons atingindo a superfície sensível do fotomultiplicador, conforme esperado pela lei do inverso do quadrado da distância. A consistência dos picos sugere que o LED estava operando em uma frequência constante, com a mesma intensidade de emissão ao longo do tempo.

Com a fonte de luz LED posicionada a uma distância de 20 cm do detector, o comportamento da curva se manteve similar ao observado na condição anterior, com picos de contagem periódicos. No entanto, nota-se um aumento significativo na magnitude das contagens, com os picos atingindo valores próximos a 1.800.000 contagens por intervalo de tempo, como mostrado na Figura 5.

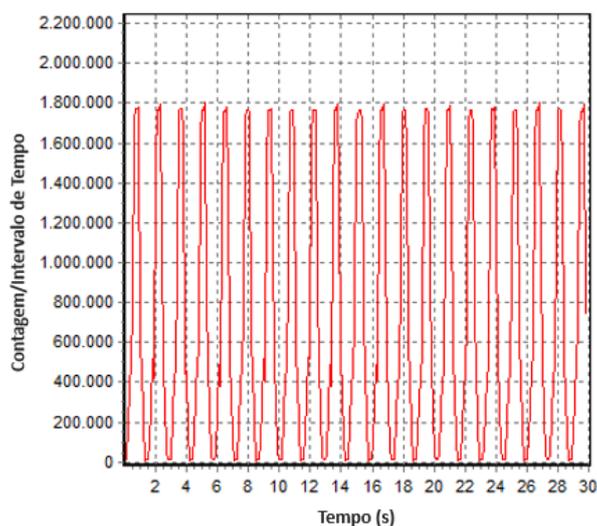


Fig. 5. Gráfico dos dados de contagens por intervalo de tempo, utilizando uma fonte de luz LED vermelha posicionada a 20 cm do detector fotomultiplicador.

Essa diferença de intensidade pode ser explicada pela maior proximidade do LED ao fotomultiplicador na condição de 20 cm. Embora a maior distância em tese deveria reduzir a intensidade detectada, outros fatores como a configuração do sistema óptico ou a amplificação do sinal, podem ter influenciado no aumento do número de contagens. O comportamento periódico dos picos, no entanto, permanece estável e consistente, sugerindo que o LED manteve seu padrão de emissão regular.

3.4 Análise Comparativa

Comparando as duas medições com o LED, a diferentes distâncias (Figuras 4 e 5), observamos uma clara distinção na intensidade dos picos detectados pelo fotomultiplicador. Com a fonte de luz a 10 cm, os picos atingem valores máximos de cerca de 120.000 contagens, enquanto que na configuração com a fonte de luz a 20 cm, os picos atingem até 1.800.000 contagens. Este comportamento é contraintuitivo, uma vez que, de acordo com a relação inversa entre intensidade e distância, seria esperado que a medida a 10 cm resultasse em contagens mais altas. Contudo, a amplificação do sinal na medida a 20 cm pode indicar uma maior eficiência do sistema de detecção sob essas condições.



Esta disparidade pode estar relacionada ao ajuste dos parâmetros de operação do fotomultiplicador, como a alta tensão aplicada (HV), ou a condições específicas do experimento, como a geometria do sistema e as características do ambiente. O comportamento periódico, em ambos os casos, reforça a confiabilidade do sistema de detecção e a estabilidade da fonte emissora, garantindo a reprodutibilidade dos resultados. Mais estudos podem ser necessários para investigar com maior precisão os fatores que influenciaram a diferença na magnitude das contagens.

Apesar de a maior distância entre o LED e o detector resultar em contagens maiores, o que contradiz a expectativa baseada na lei do inverso do quadrado da distância, este comportamento pode estar relacionado a fatores como ajustes de amplificação do sinal e a geometria específica do sistema. Mais experimentos são necessários para investigar as condições que causaram esse comportamento inesperado.

4. CONCLUSÃO

Os resultados deste estudo evidenciam a importância da calibração do todo fotomultiplicador (módulo H9319) para medições precisas de radiação gama e nêutrons, utilizando o cristal cintilador LiI (Eu). A comparação das medições em ambiente sem a interferência de luz externa e com a utilização de luz LED posicionados a diferentes distâncias demonstrou a estabilidade e a eficiência do sistema. O uso de um LED vermelho difuso, com comprimento de onda de 648 nm, foi fundamental para simular os pulsos de luz gerados pelos cintiladores em condições controladas, permitindo ajustes precisos nos parâmetros de ganho e resposta temporal do módulo. A eficiência do LED em testar e calibrar o sistema, ressalta sua utilidade na otimização de sistemas de detecção. Estes resultados contribuem diretamente para a melhoria do desempenho do sistema digitalizador, garantindo medições mais confiáveis e ampliando suas aplicações tecnológicas em diversos setores, incluindo a detecção de radiação em grandes distâncias com pequenas perdas de sinal.

Embora o sistema de detecção tenha apresentado alta eficiência, os resultados mostraram discrepâncias inesperadas na intensidade de luz detectada em diferentes distâncias do LED. Mais experimentos são necessários para compreender melhor esses resultados e otimizar ainda mais o sistema de detecção.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às agências brasileiras de financiamento de pesquisa: CNEN, CAPES, CNPq e FAPEMIG, pelo apoio, ao Departamento de Engenharia Nuclear da UFMG.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] E. Rutherford, *The Collected Papers of Lord Rutherford of Nelson*, v. 3, 1ª ed., London, Routledge (2015).
- [2] G. F. Knoll, *Radiation Detection and Measurement*, New York, Wiley (1999).
- [3] N. Tsoulfanidis, *Measurement and Detection of Radiation*, New York, Harper & Row (1983).



- [4] C. Dujardini, *et al*, Needs, Trends, and Advances in Inorganic scintillators, IEEE Transactions on Nuclear Science, v. 65, p. 1977-1995 (2018).
- [5] L. Tahuata, *et al*, Radioproteção e dosimetria: Fundamentos, 9. rev., Rio de Janeiro, IRD-CNEN (2013).
- [6] N. J. Cherepy, *et al*., Comparative Gamma Spectroscopy with Sr12(Eu), GYGAG(Ce) and Bi-loaded Plastic Scintillators, IEEE Nuclear Science Symposium, Knoxville, pp. 1288-1291, november (2010).
- [7] G. F. Knoll, Radiation Detection and Measurement, John Wiley & Sons, 5th ed., Michigan (2020).
- [8] S. Gundacker, *et al*., SiPM time resolution: From single photon to saturation, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, Vol. 718, pp. 569-572, august (2013).
- [9] C. Bourgeois, *et al*., LED-Based Calibration System for the LHCb RICH Detectors, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, Vol. 754, pp. 41-49 (2014).
- [10] H. Nakamura, *et al*., Development of a LED-Based Light Source for Calibration of Photomultiplier Tubes, Journal of Instrumentation, Vol. 12(05) (2017).
- [11] F. Khan, *et al*., A Study of the Temperature Dependence of LEDs and Its Application in the Validation of a Large Water Cherenkov Detector, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, Vol. 782, pp. 83-91 (2015).
- [12] T. Schmid, *et al*., Real-Time Digital Signal Processing for Calibrating Scintillation Detectors, IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 65(8), pp. 1767-1774 (2018).
- [13] http://www.symtronic.com.br/arquivos/SYM-R503-30-D_8206.pdf acessado em 22/06/2024.
- [14] Y. Nouailhetas, C. E. B. Almeida, S. Pestana, Radiações ionizantes e a vida, Rio de Janeiro, CENEN (2016).
- [15] <https://cafenobequer.wordpress.com/2020/12/04/bananas-radioativas-e-espectroscopia-gama/> acessado em 26/09/2022.