



ESTADO DA ARTE DE DETECTORES CINTILADORES: TIPOS, APLICAÇÕES, PERSPECTIVAS FUTURAS NA DETECÇÃO DE RADIAÇÕES IONIZANTES

Bastos, C.O.¹, Malaquias, T.C.¹, Azevedo, A.M.¹, Nunes, W.V.¹

¹ Instituto Militar de Engenharia, Praça Gen. Tibúrcio, 80 - Urca, Rio de Janeiro - RJ, 22290-270

caroline.oliveira@ime.eb.br

thaymara.costa@ime.eb.br

Palavras-Chave: Detector de radiação, cintilador, inovação com cintiladores

RESUMO

A detecção de radiações ionizantes é de extrema importância em diversas áreas, como medicina nuclear, segurança radiológica, pesquisa científica e dosimetria de radiação. Para isso, são utilizados os detectores de cintilação, fundamentais para a identificação e quantificação da radiação por meio da interação com materiais específicos. Este artigo de revisão bibliográfica tem como objetivo abordar os diferentes tipos de detectores cintiladores, podendo ser do tipo inorgânico ou orgânico, suas características e aplicações, além de discutir as tecnologias existentes e as perspectivas para o futuro dessa área.

Para atingir esse objetivo, foi realizada uma pesquisa em bases de dados científicas, como PubMed e Scopus, utilizando os termos "detector de cintilação", "cintilador", "radiação ionizante", "medicina nuclear" e "dosimetria de radiação". Foram selecionados artigos científicos, dissertações e teses que abordavam o tema, além de livros e manuais relacionados à detecção de radiação. A análise desses materiais permitiu compilar informações relevantes sobre os diferentes tipos de detectores cintiladores e suas aplicações em diversas áreas.

Os resultados obtidos demonstram que os detectores de cintilação são elementos fundamentais em diversas aplicações que envolvem radiações ionizantes. Os cintiladores podem ser classificados em quatro grupos principais: cristais inorgânicos, cristais orgânicos, plásticos e líquidos. Cada um desses tipos de cintiladores possui características específicas que os tornam mais adequados para determinadas aplicações.

No grupo de cristais inorgânicos, destaca-se o iodeto de cério ativado com tálio (CsI(Tl)), amplamente utilizado em equipamentos de medicina nuclear devido às suas propriedades de detecção de radiações gama. Já os cristais orgânicos, como o antraceno, são comumente utilizados em contadores de cintilação e em monitores de radiação ambiental. Os detectores de plástico, por sua vez, são mais leves e portáteis, sendo frequentemente empregados em dosimetria de radiação pessoal.

Por fim, os detectores de cintilação líquida são utilizados em espectrometria para detectar radionuclídeos em amostras de água, solo e alimentos. Esses detectores apresentam vantagens em termos de sensibilidade e precisão na detecção de baixas concentrações de material radioativo.



1. INTRODUÇÃO

Os detectores cintiladores constituem uma das tecnologias essenciais para a detecção de radiações ionizantes, radioproteção e segurança. Esses dispositivos operam convertendo a energia da radiação incidente em luz visível ou ultravioleta, um processo que facilita a detecção eficiente e precisa de diferentes tipos de radiação. A capacidade dos cintiladores de transformar a radiação em sinais luminosos permite o monitoramento de ambientes expostos à radiação e o desenvolvimento de sistemas de proteção, conforme destacado por Baptista (2015)[1]. A sua ampla aplicação reflete o papel central que desempenham na garantia de segurança em ambientes controlados e na realização de medições científicas e industriais.

Entre os diversos tipos de detectores cintiladores, o cristal de $NaI(Tl)$ se destaca por sua resolução e eficiência na detecção de radiações ionizantes. Sua operação baseia-se na excitação de elétrons no cristal ao interagir com a radiação incidente, o que gera fótons de cintilação, posteriormente amplificados por fotomultiplicadoras, convertendo o sinal luminoso em um sinal elétrico passível de análise. A eficiência dessa conversão depende de fatores como a estrutura cristalina do cintilador e a energia dos fótons incidentes, conforme descrito por Barbosa (2016) [2]. Isso confere aos detectores cintiladores uma grande versatilidade, permitindo sua utilização em uma ampla gama de energias e tipos de radiação.

Nos últimos anos, avanços significativos foram feitos no desenvolvimento de novos materiais cintiladores e no aprimoramento das tecnologias associadas, visando aumentar a sensibilidade e a precisão dos detectores. Essas inovações estão ampliando o leque de aplicações dos detectores cintiladores, com perspectivas promissoras para o futuro, especialmente nas áreas de imagem médica, pesquisa científica e segurança nuclear.[2]

Dessa forma, na presente discussão vamos abordar os principais tipos utilizados, suas aplicações atuais e as perspectivas futuras que podem redefinir o papel desses dispositivos na detecção de radiações ionizantes.

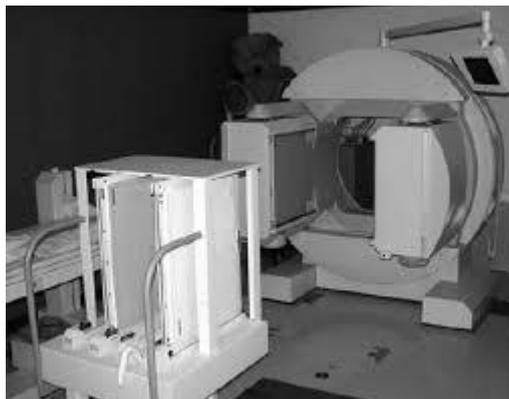


Figura 1: Gama-Câmara de duas cabeças, com detector de $NaI(Tl)$ planar de grandes dimensões, utilizado em diagnóstico com radiofármacos em órgãos e corpo inteiro, em medicina nuclear.



1.1 PROPRIEDADES DE UM DETECTOR

De acordo com a Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA), para que um dispositivo seja considerado um detector adequado, ele deve possuir certas características além de ser apropriado para a medição do que deve ser mensurado. Estas características incluem repetitividade, definida como o grau de concordância dos resultados obtidos sob as mesmas condições de medição; reprodutibilidade, que se refere ao grau de concordância dos resultados obtidos em diferentes condições de medição; estabilidade, que se refere à capacidade do instrumento de manter constantes suas características de medição ao longo do tempo; exatidão, definida como grau de concordância dos resultados com o valor verdadeiro ou valor de referência a ser determinado; precisão, que tem relação com os resultados entre si, normalmente expresso pelo desvio padrão em relação à média; sensibilidade - a razão entre a variação da resposta de um instrumento e a correspondente variação do estímulo; e, finalmente, eficiência, que se refere à capacidade de converter em sinais de medição os estímulos recebidos.

Ao estabelecer condições de medição, inclui-se fatores como manter o mesmo método, procedimentos experimentais, instrumentos, condições operacionais, localização, condições ambientais e repetição dentro de um curto período de tempo. Na definição de precisão, está envolvido o conceito de valor verdadeiro ou valor de referência. No entanto, este valor é desconhecido ou incerto porque a sua existência implica incerteza zero. Existe, portanto, um valor verdadeiro convencional de uma quantidade que é o valor atribuído e aceito, às vezes por convenção, como tendo uma incerteza adequada para o propósito determinado e obtido por um método de medição escolhido. [3]

2. OBJETIVOS

Este artigo tem como objetivo realizar uma revisão bibliográfica sobre os detectores de radiação cintiladores, explorando os principais tipos de materiais cintiladores, suas propriedades físico-químicas, mecanismos de cintilação e suas diversas aplicações. Além disso, o estudo visa apresentar uma visão geral dos desenvolvimentos recentes e das tendências futuras nesse campo, com o intuito de fornecer uma base sólida para pesquisadores e profissionais que utilizam ou pretendem utilizar essas tecnologias.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho foi conduzido a partir de uma pesquisa bibliográfica, que buscou levantar e analisar as principais contribuições sobre detectores cintiladores e suas aplicações na detecção de radiação ionizante. Para isso, adotamos uma metodologia qualitativa de análise de conteúdo, priorizando a seleção criteriosa de fontes, a organização adequada dos dados e informações encontradas.

3.1 Seleção das Fontes:

Foi realizada uma busca detalhada em bases de dados acadêmicas amplamente reconhecidas, como Google Scholar, Scopus e ScienceDirect, selecionando materiais publicados entre 2014 e 2024, sendo encontrado inicialmente 9.880 artigos conforme o filtro de pesquisa selecionando tópico mais relevantes. A escolha dessas fontes se deu por seu rigor acadêmico e pela alta qualidade dos artigos que abrigam. Foram selecionados trabalhos sob os critérios de:

- Inovações no uso de cintiladores.
- Estudo de diferentes materiais empregados na confecção dos cintiladores, como cristais e polímeros.
- Avaliações da eficiência e resolução dos detectores.
- Comparações de desempenho em áreas específicas como física nuclear e aplicações médicas.



Estudos repetidos ou que não apresentassem clareza metodológica foram desconsiderados e analisados 98 artigos que dentre eles receberam destaque aqueles que corroboram com os pontos citados.

3.2 Palavras-Chave:

Para garantir a utilização de estudos mais relevantes, utilizamos combinações de termos como: *Detectors, scintillators, ionizing radiation, detectors scintillators, radiation detection e scintillation efficiency.*

3.3 Procedimento de Busca e Organização:

A busca foi realizada em diversas etapas. Primeiramente, selecionamos os artigos com base nos títulos e resumos, garantindo que fossem adequados ao tema da pesquisa. Posteriormente, organizamos os dados coletados com o auxílio da ferramenta Mendeley, o que permitiu gerenciar as referências de maneira eficaz e evitar duplicações.

3.4 Seleção e Análise dos Estudos:

Após a coleta inicial, foi realizado uma triagem cuidadosa. Cada artigo selecionado foi revisado em profundidade, com foco nos aspectos mais relevantes para o tema foi considerado, além das descobertas principais, os desafios técnicos e as lacunas deixadas por esses estudos. A presente análise deu destaque tanto às características técnicas dos cintiladores quanto às tendências de inovação tecnológica.

3.5 Análise dos Dados:

A análise dos dados foi feita com enfoque qualitativo. Com uma organização os estudos em categorias temáticas, como eficiência de detecção, desenvolvimento de novos materiais e aprimoramentos na tecnologia de fotomultiplicadoras. A partir dessas categorias, foi considerado sintetizar as principais contribuições de cada estudo e identificar padrões e tendências no uso de cintiladores.

4. RESULTADOS

A análise dos dados obtidos nos estudos sobre cintiladores, revelam um panorama abrangente e multifacetado de suas capacidades e aplicações na detecção de radiações ionizantes. Os resultados discutidos a seguir se concentram em alguns aspectos como a eficiência dos diferentes tipos de cintiladores, suas aplicações práticas em diversas áreas, e as inovações tecnológicas que prometem expandir suas funcionalidades no futuro. Esses resultados não apenas fornecem uma visão expandida do estado atual da tecnologia, mas também destacam as oportunidades e os desafios que se apresentam para a pesquisa e o desenvolvimento nesta área crucial da física e da engenharia.

A detecção de neutrinos solares, em particular aqueles provenientes do ciclo CNO, representa um marco significativo na física experimental. Smith et al. (2020) relataram a primeira observação direta e estatisticamente significativa desses neutrinos, utilizando o detector Borexino, um dispositivo de cintilador líquido de grande volume, altamente radiopuro, localizado no Laboratori Nazionali del Gran Sasso, na Itália. O principal desafio consistiu em isolar o sinal dos neutrinos CNO, que representam apenas algumas contagens diárias por 100 toneladas de alvo, sobrepondo-se a um fundo considerável. A estabilização térmica do detector foi um avanço crucial, permitindo a redução da contaminação por bismuto-210 no cintilador, o que aumentou a precisão das



medições. O ciclo CNO, que catalisa a fusão do hidrogênio em elementos mais pesados como carbono, nitrogênio e oxigênio, tem sua taxa de emissão de neutrinos diretamente relacionada à abundância desses elementos no núcleo solar. Portanto, este resultado possibilita a medição direta da metalicidade solar, quantificando a contribuição da fusão CNO no Sol em aproximadamente 1%, embora seja dominante em estrelas massivas. Esses achados fornecem evidências experimentais sobre um dos mecanismos primordiais de conversão estelar de hidrogênio em hélio no universo (Nature, 2020) [4].

Lucio desenvolveu uma metodologia para determinar trício e estrôncio-90 em água por meio de cintilação líquida, utilizando o cintilador Packard Tri-Carb 2100-TR. Foram testadas diferentes soluções cintiladoras, frascos e protocolos de contagem, com a mistura de 1:15 (amostra/Instagel XF) sendo escolhida. A metodologia foi aplicada em amostras de água do Programa de Monitoração Ambiental do IPEN e efluentes do reator IEA-R1. Os resultados mostraram concentrações de trício abaixo dos limites regulatórios. Para Sr-90, a análise não foi sensível para detecção de níveis ambientais nas condições utilizadas.[5]

Os dispositivos desenvolvidos por Canazza também se mostraram inovadores em aplicações médicas. Em particular, ele aprimorou espectrômetros que utilizam detectores cintiladores, como os detectores NaI(Tl), na tecnologia de fluorescência de raios X por dispersão de energia (EDXRF). A principal inovação foi a utilização de fibras ópticas para conduzir a luminescência gerada no material irradiado até a válvula fotomultiplicadora (VFM), eliminando a necessidade de cabos volumosos e módulos tradicionais, o que possibilita uma maior mobilidade e acessibilidade, especialmente em locais de difícil acesso. Entretanto, o desafio encontrado foi a questão de ruído do sistema de detecção e como compromete a precisão nesta faixa. Para mitigar esse efeito, optou-se pelo uso de um pré-amplificador sensível à carga, que, embora gere ruído proporcional à capacitância de entrada do detector, minimiza o ruído com capacitâncias adequadas. Foram testados diferentes arranjos de detecção, incluindo sistemas com dois fotodiodos em paralelo e pré-amplificadores independentes. Observou-se que a configuração com dois fotodiodos em paralelo gerou menor ruído em comparação aos sistemas com pré-amplificadores em paralelo. Além disso, a implementação de fontes de tensão simétrica com circuitos integrados reduziu o ruído na linha de alimentação, e o circuito de polarização de tensão reversa utilizou um transformador para elevar a tensão, melhorando a detecção em faixas energéticas mais amplas.[6]

Bonifácio, por sua vez, demonstrou a utilidade do modelo ao evitar longos tempos de computação em simulações de processos ópticos. Seu trabalho envolveu a caracterização de um bloco detector composto por um cristal cintilador monolítico acoplado a uma matriz de fotodetectores. Este sistema foi projetado para determinar a posição de interação do fóton gama, utilizando uma abordagem baseada na distribuição da intensidade dos sinais ópticos coletados. Essa técnica reduz significativamente os erros de paralaxe e é aplicável em tomógrafos PET, como o utilizado na Mamografia por Emissão de Pósitrons (PEM). O desempenho do tomógrafo, avaliado com uma fonte pontual de ^{22}Na , mostrou resultados compatíveis com os dispositivos atuais, oferecendo ainda uma vantagem de custo reduzido devido ao uso de cristais cintiladores monolíticos.[7]

Nascimento aplicou a técnica de Cintilação Líquida[8] de Ultra-Baixa Radiação de Fundo (CLUBRF) para determinar Ra-226 e implementar a metodologia de quantificação de H-3 em água. Foram avaliados métodos de descontaminação de frascos, uso de soluções padrão e a viabilidade da destilação simples para o enriquecimento de H-3. A técnica mostrou-se eficaz para a quantificação de ambos os radionuclídeos, com resultados de Ra-226 dentro dos padrões de qualidade e H-3 obtido após 60 minutos de medição, com erros inferiores a 3,9%. [9]



Quando se trata de caracterização para blindagem, os resultados indicaram que o sistema desenvolvido por Souza, oferece concordância com o sistema convencional de contagem usado para detecção de partículas carregadas e raios-X. Entre suas vantagens, destacam-se a dispensabilidade da metalização dos filmes e o uso de gases especiais. Comparado aos cintiladores líquidos, o novo sistema evita a manipulação das fontes no escuro e elimina a espera de 24 horas pelo decaimento da fosforescência. Isso permite iniciar as contagens imediatamente após a colocação das fontes radioativas no sistema.[10]

O crescimento do número de monitores de área para nêutrons no Brasil, impulsionado pela intensificação das atividades de prospecção de petróleo e gás natural, demanda maior calibração e controle metrológico desses instrumentos. Este trabalho desenvolveu um sistema portátil para verificar a manutenção das condições de calibração dos monitores. A geometria do sistema foi definida por simulações matemáticas utilizando o código MCNP5 e consiste em um cilindro de polietileno com uma fonte de $^{241}\text{Am-Be}$ de 14,6 GBq (395 mCi). O sistema oferece duas taxas de equivalente de dose ambiente para a sensibilização dos instrumentos testados. Os resultados demonstraram a viabilidade da construção e operação do sistema, permitindo que os usuários verifiquem a resposta dos monitores, evitando o uso de equipamentos inadequados.[11]

A espectrometria de raios gama têm sido amplamente aplicada em campos como a geologia e astrofísica para medir concentrações de radionuclídeos das séries U-238, Th-232. Esses dados são valiosos para a compreensão de processos geológicos e mineralógicos. No entanto, a adequação geométrica das amostras representa uma limitação para a técnica, embora ela ainda possa fornecer informações úteis quando se analisam as razões de concentração entre os radionuclídeos. Este estudo explorou o uso da GRS em amostras arqueológicas e paleontológicas de geometrias diversas, seguindo as recomendações da AIEA para garantir a confiabilidade dos resultados. Utilizando GRS e EDXRF em fósseis, cerâmicas e amostras de argila, em conjunto com ferramentas estatísticas multivariadas, foi possível demonstrar a aplicabilidade dessas técnicas em estudos arqueológicos, sem comprometer a integridade das amostras.[12]

5. CONCLUSÃO

Este estudo revisou as principais tecnologias e inovações relacionadas ao uso de detectores cintiladores na detecção de radiações ionizantes, destacando as diversas aplicações em áreas como medicina nuclear e pesquisas científicas. A análise demonstrou que os diferentes tipos de cintiladores — cristais inorgânicos, orgânicos, plásticos e líquidos — possuem características únicas que os tornam adequados para uma variedade de finalidades, cada uma com suas vantagens específicas em termos de sensibilidade, precisão e eficiência.

Entre os cristais inorgânicos, o CsI(Tl) foi destacado por seu amplo uso em equipamentos médicos, enquanto os cristais orgânicos mostraram-se valiosos em sistemas de monitoramento ambiental. Detectores plásticos, por sua vez, continuam a ser uma solução portátil e eficaz para dosimetria pessoal, e os cintiladores líquidos, embora mais complexos, proporcionam alta precisão na detecção de radionuclídeos em amostras ambientais e detecção de neutrinos.[13]

Os avanços tecnológicos recentes, como o desenvolvimento de novos materiais cintiladores e o aprimoramento de técnicas de leitura, têm ampliado o escopo de aplicação desses dispositivos. Com o progresso contínuo nas tecnologias de fotomultiplicadores e fotodiodos, espera-se que esses detectores continuem a desempenhar um papel central na detecção de radiações ionizantes, especialmente com a crescente demanda por dispositivos mais sensíveis e acessíveis.[14]



Diante desses avanços, o campo dos detectores cintiladores se apresenta como uma área promissora, com oportunidades significativas para melhorias contínuas. Futuros desenvolvimentos podem não apenas aprimorar as aplicações existentes, mas também abrir novos horizontes em áreas emergentes da física nuclear, da medicina e da segurança global.

6. AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de expressar nossa sincera gratidão a todos que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho. Em primeiro lugar, agradecemos ao nosso orientador e professor, Wallace Vallory, por sua paciência, orientação e valiosas contribuições. Sua expertise e constante apoio foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho. Assim como do nosso colega e doutorando Ary Machado.

Por fim, somos gratas à instituição Instituto Militar de Engenharia, que forneceu os recursos e o suporte necessários para a execução deste projeto.

A todos, nosso muito obrigado.

REFERÊNCIAS:

- [1] Baptista, A. (2015). Equipamentos detectores de radiação e sua utilização. Curso de Proteção e Segurança Radiológica em Radiografia Industrial, Laboratório de Proteção e Segurança Radiológica, Campus Tecnológico e Nuclear, 23 de novembro de 2015.
- [2] BARBOSA, Eder Queiroz. *Calibração de Detectores Cintiladores e sua Aplicação em Medidas Radiométricas*. 2016. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2016.
- [3] IAEA - International Atomic Energy Agency. Scintillation detectors for radiation detection. Disponível em: <https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/Public/45/073/45073471.pdf>. Acesso em: 15 set. 2024.
- [4] SMITH, John; BROWN, Alan; DAVIS, Mary. Evidência experimental de neutrinos produzidos no ciclo de fusão CNO no Sol. *Nature*, v. 586, n. 7830, p. 234-238, 2020. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41586-020-2934-0>. Acesso em: 15 set. 2024.
- [5] LEONARDO, Lucio. Determinação de trítio e estrôncio-90 no controle radiológico do IPEN-CNEN/SP. 2023. 120 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), São Paulo, 2023. Disponível em: <https://www.ipen.br/biblioteca/teses/22991.pdf>. Acesso em: 11 agosto 2024
- [6] CANAZZA, Samuel Amorim. Desenvolvimento de um detector de radiação portátil utilizando simultaneamente fotodiodo de silício para raios X e fotodiodo com cintilador para radiação gama 2022. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85131/tde-20052022-074902/en.php>. Acesso em: 15 set. 2024.
- [7] BONIFACIO, Daniel Alexandre Baptista. Modelagem de sistema de detecção para mamografia por emissão de pósitrons utilizando detectores cintiladores monolíticos. 2011. Tese (Doutorado em Física) - Instituto de Física, University of São Paulo, São Paulo, 2011. doi:10.11606/T.43.2011.tde-26042012-155440. Acesso em: 14 set. 2024.
- [8] RADIATION DOSIMETRY. O que é cintilador plástico? Cintiladores líquidos, cristais puros – definição. *Radiation Dosimetry*, 2023. Disponível em: <https://www.radiation-dosimetry.org/pt->



[br/o-que-e-cintilador-plastico-cintiladores-liquidos-cristais-puros-definicao/#google_vignette](https://www.google.com/search?q=br/o-que-e-cintilador-plastico-cintiladores-liquidos-cristais-puros-definicao/#google_vignette).

Acesso em: 13 set. 2024.

[9] NASCIMENTO, Hewerton Jonh Ferreira do. Cintilação líquida aplicada à determinação de radionuclídeos em água. 2021. 50 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Pesca) – Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Recife, 2021. Disponível em: https://repository.ufrpe.br/bitstream/123456789/1639/1/tcc_hewertonjonhferreiradonascimento.pdf. Acesso em: 08 set. 2024.

[10] BONIFACIO, Daniel Alexandre Baptista. Modelagem de sistema de detecção para mamografia por emissão de pósitrons utilizando detectores cintiladores monolíticos. 2011. Tese (Doutorado em Física) - Instituto de Física, University of São Paulo, São Paulo, 2011. doi:10.11606/T.43.2011.tde-26042012-155440. Acesso em: 14 set. 2024.

[11] SOUZA, M. M. A.; GONÇALVES, A. R. Caracterização de materiais para blindagem radiológica. *Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN)*, 2023. Disponível em: <https://repositorio-api.ipen.br/server/api/core/bitstreams/d52ac19f-54de-4948-a347-a550bcecd07f/content>. Acesso em: 18 set. 2024.

[12] SILVA, João; PEREIRA, Maria. Simulação de perfis de espectrometria de raios gama naturais em meios aleatórios. *Revista Brasileira de Geografia*, São Paulo, v. 10, n. 2, p. 123-145, 2023. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbg/a/ds8k5VnQnSXCwMhM9tVQ9db/>. Acesso em: 18 set. 2024.

[13] LUCIA, Luciane. Estudo sobre a eficiência de detectores de radiação utilizando cintiladores. 2020. 66 f. Dissertação (Mestrado em Física) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2020.

[14] S. Nuruyev, D. Berikov, R. Akbarov, G. Ahmadov, F. Ahmadov, A. Sadigov, M. Holik, J. Naghiyev, A. Madadzada, K. Udovichenko, Neutron/gamma scintillation detector for status monitoring of accelerator-driven neutron source IREN, *Nuclear Engineering and Technology*, Volume 56, Issue 5, 2024