

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
BIOMÉDICA

RAISA REQUI JAKUBIAK

**AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA DE DETECÇÃO DE RADIAÇÕES
IONIZANTES UTILIZANDO DIODO PIN PARA CONTROLE DE
FONTES ÓRFÃS**

DISSERTAÇÃO

CURITIBA

2020

RAISA REQUI JAKUBIAK

**AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA DE DETECÇÃO DE RADIAÇÕES
IONIZANTES UTILIZANDO DIODO PIN PARA CONTROLE DE FONTES ÓRFÃS**

**Evaluation of a pin diode-based ionizing radiation detection system for controlling
orphan sources**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Biomédica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para obtenção do título de “Mestre em Ciências” - Área de Concentração: Engenharia Forense.

Orientador: Prof. Dr. Rubens Alexandre de Faria

Coorientadora: Profa. Dra. Rosangela Requi Jakubiak

CURITIBA

2020



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta é a mais restritiva das nossas seis licenças principais, só permitindo que outros façam download dos seus trabalhos e os compartilhem desde que atribuam crédito a você, mas sem que possam alterá-los de nenhuma forma ou utilizá-los para fins comerciais.



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação

TERMO DE APROVAÇÃO DE DISSERTAÇÃO Nº131

A Dissertação de Mestrado intitulada “AVALIAÇÃO DE UM SISTEMA DE DETECÇÃO DE RADIAÇÕES IONIZANTES UTILIZANDO DIODO PIN PARA CONTROLE DE FONTES ÓRFÃS”, defendida em sessão pública pela candidata Raisia Requi Jakubiak, no dia 6 de novembro de 2019, foi julgada para a obtenção do título de Mestre em Ciências, área de concentração Engenharia Biomédica, linha de pesquisa Engenharia Forense e aprovada em sua forma final, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Biomédica.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Rubens Alexandre Faria – UTFPR

Prof. Dr. Charlie Antoni Miquelin – UTFPR

Prof. Dr. Ezequiel Burkarter - IFPR

A via original deste documento encontra-se arquivada na Secretaria do Programa, contendo a assinatura da Coordenação após a entrega da versão corrigida do trabalho.

Curitiba, 6 de novembro de 2019.

Carimbo e Assinatura do(a) Coordenador(a) do Programa

Dedico este trabalho à minha avó, Maria Carvalho Jakubiak (*in memoriam*), cuja maior alegria era saber que seus netos estavam estudando.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao DAFIS – UTFPR pela disponibilização de laboratórios e materiais.

Agradeço ao professor Charlie Miquelin pela disponibilidade.

Agradeço à Engisa por disponibilizar as fontes comerciais para os experimentos, em especial ao Antônio, que nos atendeu com grande cordialidade.

Agradeço ao Esquadrão Antibombas da PMPR pela disponibilização de equipamento e pela constante troca de experiências na área QBRN.

Agradeço ao meu orientador, o Rubão, por aceitar me orientar nesse projeto tão cheio de desafios.

Agradeço aos meus pais – minha mãe e coorientadora, Rosangela, e meu pai e professor Douglas, o lendário Jakubiak, que me desafiaram pela ciência desde cedo. É privilégio de poucos transformar um trabalho de mestrado num projeto de família.

Agradeço à minha irmã, Ingrid, pelo companheirismo.

Agradeço ao professor Marlus Koehler e ao Cleber e o André, meus grandes amigos, pelas discussões que contribuíram com os resultados finais deste trabalho.

Agradeço a todos os amigos e familiares que de alguma maneira me incentivaram.

Agradeço, finalmente, ao professor Ivo Hümmelgen (*in memoriam*). Sem os conhecimentos do tempo em que fui aluna de IC no *GOOD*, este trabalho não seria possível.

RESUMO

JAKUBIAK, Raisa Requi. **Avaliação de um sistema de detecção de radiações ionizantes utilizando diodo PIN para controle de fontes órfãs**. Dissertação: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Biomédica - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2019.

O contrabando de materiais radioativos e nucleares é um problema enfrentado pelas agências de inteligência e polícias do mundo todo desde a década de 1990. A segurança física de materiais radioativos e nucleares tem a detecção como um de seus pilares. Nesse sentido, o presente trabalho apresenta a avaliação da capacidade de um sistema baseado em diodo PIN em detectar radiação gama proveniente do decaimento de isótopos radioativos, para posterior aplicação como equipamento auxiliar da segurança pública em treinamentos e detecção de fontes órfãs. Foram testados seis diodos, escolhidos com base no pico de sensibilidade e na janela de absorção, compatíveis com as faixas energéticas estudadas – raios X e raios gama. Os sensores foram expostos a quatro situações diferentes: raios X na faixa de diagnóstico, com várias combinações de tensão (kV) e corrente (mAs), para confirmação de que o sistema estava operando de forma adequada; pulsos de raios X de um gerador industrial, com caráter qualitativo; fontes didáticas de Am-241, Na-22, Sr-90 e Co-60 e, finalmente, fontes comerciais de Cs-137 e Ir-192. Foi possível caracterizar a detecção de fótons na faixa dos raios X para todas as combinações kV e mAs, para 100% dos diodos testados. Nas medições com radioisótopos, contudo, fica claro que o sistema não é capaz de detectar fótons gama originados no decaimento radioativo dos materiais analisados. Apesar de alguns picos de tensão serem observados, não é possível caracterizá-los como detecção devido à natureza aleatória das leituras. O problema foi atribuído, inicialmente, à baixa atividade das fontes didáticas analisadas. Contudo, após medições com o irradiador industrial de Ir-192, atribuiu-se o problema à natureza do silício como detector de raios gama. Finalmente, este estudo conclui que o sistema avaliado pode ser utilizado para medições com raios X, mas não apresenta sensibilidade suficiente para ser utilizado no rastreamento de radionuclídeos.

Palavras chave: Detectores de radiação. Diodo PIN. Forense nuclear

ABSTRACT

JAKUBIAK, Raisa Requi. **Evaluation of a PIN diode-based ionizing radiation detection system for controlling orphan sources.** Thesis: Graduate School of Biomedical Engineering Technological University Federal of Paraná. 2019

Nuclear and radioactive material smuggling pose a great challenge for intelligence agencies worldwide since the 1990's. Nuclear and radioactive material security has detection as one of its cornerstones. Therefore, the present work presents the evaluation of a PIN diode-based system as far as its capacity of detecting gamma radiation from radioactive isotopes is concerned, as well as its suitability for further use as an auxiliary equipment for public security in training and orphan sources control. Six diodes were tested. They were chosen according to their peak sensitivity and detection range, which are compatible with the energy range studied – X ray and gamma. Sensors were exposed to four different scenarios: diagnostic range X rays, with several voltage (kV) and current (mAs) arrangements, in order to confirm if the system was operating properly; X ray pulses from an industrial X ray equipment, for qualitative investigation; Am-241, Na-22, Sr-90 e Co-60 sources used for didactic purposes and, finally, commercial Cs-137 e Ir-192 sources. It was possible to characterize X ray photons detection for all kV and mAs combinations, for 100% diodes tested. For measurements with radioactive sources, however, it is clear that the system is not capable of detecting gamma photons generated due to the studied sources radioactive decay. Although some voltage peaks can be observed, it is not possible to characterize them as detection due to their random nature. The problem was firstly assigned to the low activity of the analysed didactic sources. Nevertheless, after the experiments using the Ir-192 industrial irradiator, the problem was assigned to silicon features as a gamma detector. Finally, this study concludes that the evaluated system can be used for measurements with X rays, but offers no suitable sensitivity to be used in tracking radionuclides.

Key words: Radiation detector. PIN diode. Nuclear forensics

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-------------|--|----|
| FIGURA 1 - | Zonas de exclusão resultantes dos acidentes com usinas nucleares em Chernobyl, Ucrânia, e Fukushima, Japão, logo após os desastres..... | 18 |
| FIGURA 2 - | Centenas de pessoas foram envolvidas na operação de descontaminação após o acidente com o Cs-137 em Goiânia..... | 19 |
| FIGURA 3 - | Câmara de radiografia industrial em situação de abandono. Fonte: IAEA..... | 20 |
| FIGURA 4 - | Cabeçote da bomba que continha do Cs-137 em Goiânia. Fonte: CNEN..... | 20 |
| FIGURA 5 - | Dos 3497 incidentes reportados à ITDB até 2018, 285 incidentes tem evidências suficientes para serem ligados a atividades maliciosas, Fonte: IAEA ITDB, 2019 | 21 |
| FIGURA 6 - | Captura de tela da CNS Global Incidents and Trafficking Database. Fonte: NTL..... | 22 |
| FIGURA 7 - | Espectro eletromagnético exibindo faixas de comprimento de onda (com exemplos de comprimentos comparáveis), frequência e energia. Fonte: Stanford Solar Center | 27 |
| FIGURA 8 - | Esquema de um tubo de produção de raios X. Fonte: FRCR Physics Notes..... | 29 |
| FIGURA 9 - | Espectro dos raios X emitidos após a colisão de elétrons acelerados..... | 30 |
| FIGURA 10 - | Níveis de energia e esquema de decaimento do Na-22, Co-57, Co-60 e Cs-137. As respectivas energias dos fótons gama emitidos por cada material são relacionadas, assim como as probabilidades de cada emissão. Fonte: adaptado de Radiation Detection and Measurements..... | 31 |
| FIGURA 11 - | No efeito Compton, um fóton incidente interage com um elétron orbital do material. O fóton é defletido num ângulo θ e transfere parte de sua energia cinética para o elétron. Fonte: Radiation Oncology Physics..... | 33 |
| FIGURA 12 | Diagrama esquemático de um diodo PIN. Fonte: Electronics Notes..... | 35 |
| FIGURA 13 - | Gráfico mostrando a dependência da sensibilidade calculada de um diodo com várias espessuras de filtros de cobre em relação à energia dos fótons incidentes na área sensível do dispositivo. Fonte: adaptado de (KNOLL, 2001)..... | 36 |

| | |
|---|----|
| FIGURA 14 - Gerador industrial XRS-3 utilizado pelo EAB da PMPR. Fonte: Vidisco..... | 38 |
| FIGURA 15 - Fontes didáticas Isotrak..... | 39 |
| FIGURA 16 - Osciloscópio ICEL modelo OS-2202C. Fonte: ICEL Série 2000..... | 40 |
| FIGURA 17 - Contador ST360 (a), Geiger Müller com cabo BNC (b) Fonte: Spectrum Techniques..... | 41 |
| FIGURA 18 - Monitor pessoal Rad Keeper (a), monitor na presença de uma fonte de aferição (b) Fonte: RadKeep..... | 42 |
| FIGURA 19 - Diagrama do circuito detector..... | 43 |
| FIGURA 20 - Circuito detector destacando o encaixe para o diodo e o amplificador de transresistência LM318N. os demais amplificadores estão desligados..... | 44 |
| FIGURA 21 - Circuito detector dentro da proteção de alumínio..... | 45 |
| FIGURA 22 - (a) montagem experimental utilizada durante as exposições no Laboratório de Radiações Ionizantes da UTFPR. (b) fonte de tensão e saída do circuito com blindagem de chumbo..... | 46 |
| FIGURA 23 - Tabela das combinações possíveis no equipamento Raytech..... | 47 |
| FIGURA 24 - Distâncias seguras de operação do XRS-3. Fonte: manual do XRS-3..... | 49 |
| FIGURA 25 - Montagem experimental das medições na Engisa..... | 51 |
| FIGURA 26 - O sinal mostrado pela tela do osciloscópio mostra que o detector estava funcionando de maneira adequada quando exposto a raios X..... | 52 |
| FIGURA 27 - Picos mostrados pelo osciloscópio para 200 mA e $t = 0,125$ s..... | 53 |
| FIGURA 28 - Picos mostrados pelo osciloscópio para 200 mA e $t = 0,125$ s..... | 53 |
| FIGURA 29- Resposta do diodo BPW34 em função do tempo (s) e de diferentes correntes (mA) para 44 kV..... | 54 |
| FIGURA 30 - Resposta de diferentes diodos BPW34 para feixes de raios X com diferentes tensões..... | 55 |
| FIGURA 31 - Detecção durante o disparo como XRS-3 do Esquadrão Antibombas da PMPR..... | 56 |
| FIGURA 32 - Resultados para a busca para “germanium gamma ray detectors” publicados em 2019 no Google Acadêmico..... | 60 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|------------|--|----|
| TABELA 1 - | Caraterísticas das fontes didáticas..... | 39 |
| TABELA 2 - | Características das fontes comerciais cedidas pela Engisa..... | 40 |
| TABELA 3 - | Caraterísticas dos diodos analisados..... | 42 |
| TABELA 4 - | Contagens aferidas pelo contador ST360..... | 56 |

LISTA DE SIGLAS

| | |
|-------|--|
| APS | American Physical Society |
| BG | Radiação de fundo |
| CNS | <i>James Martin Center for Nonproliferation Studies</i> |
| CNEN | Comissão Nacional de Energia Nuclear |
| DAELN | Departamento Acadêmico de Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná |
| DAFIS | Departamento Acadêmico de Física da Universidade Tecnológica Federal do Paraná |
| DDR | Dispositivo de Dispersão Radiológica |
| EAB | Esquadrão Antibombas |
| GM | Geiger-Müller |
| IAEA | Agência Internacional de Energia Atômica |
| ITDB | <i>International Trafficking Database</i> |
| LAPIM | Laboratório de Processamento em Imagens Médicas |
| kV | Tensão |
| mAs | Produto corrente <i>versus</i> tempo |
| MORC | <i>Material out of regulatory control</i> |
| PIN | Positive-Intrinsic-Negative |
| PMPR | Polícia Militar do Paraná |
| RDK | Monitor RadKeeper |
| SI | Sistema Internacional de Unidades |
| SNR | Razão Sinal Ruído |
| UTFPR | Universidade Tecnológica Federal do Paraná |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| CAPÍTULO 1 | 13 |
| 1. INTRODUÇÃO..... | 13 |
| 1.1 MOTIVAÇÃO PARA O DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO | 14 |
| 1.2.1 Geral | 15 |
| 1.2.2 Objetivos específicos..... | 15 |
| 1.3 ORGANIZAÇÃO..... | 16 |
| CAPÍTULO 2..... | 16 |
| 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 17 |
| 2.1 IMPORTÂNCIA DA DETECÇÃO NA SEGURANÇA FÍSICA..... | 19 |
| 2.2 ONDAS ELETROMAGNÉTICAS E EMISSÃO DE RADIAÇÃO | 23 |
| 2.2.1. Radioatividade..... | 25 |
| 2.3 INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO COM A MATÉRIA..... | 27 |
| 2.3.1 Características das radiações..... | 28 |
| 2.3.2 Interações dos fótons com a matéria..... | 31 |
| 2.3.3 Grandezas relevantes..... | 33 |
| 2.4 DIODO PIN..... | 35 |
| CAPÍTULO 3 | 37 |
| 3. MATERIAIS E MÉTODOS | 37 |
| 3.1 MATERIAIS..... | 37 |
| 3.1.1 Emissores de raios X | 37 |
| 3.1.2 Fontes | 38 |
| 3.1.3 Instrumentos de medição | 40 |
| 3.1.4 Diodos..... | 42 |
| 3.1.5 Configurações do sistema | 43 |
| 3.1.6 Outros materiais..... | 45 |
| 3.2 MÉTODOS | 45 |
| 3.2.1 Medições com raios X Raytech | 46 |
| 3.2.2 XRS-3..... | 48 |
| 3.2.3 Fontes didáticas..... | 49 |
| 3.2.4 Fontes comerciais..... | 50 |

| | |
|---|-----------|
| CAPITULO 4 | 52 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES | 52 |
| 4.1 TESTES DE EXPOSIÇÃO DO SENSOR À DIFERENTES FONTES DE RADIAÇÃO IONIZANTE..... | 52 |
| 4.1.1 Raios X | 52 |
| 4.1.2 Fontes didáticas..... | 56 |
| 4.1.3 Fontes comerciais..... | 58 |
| 4.2 SILÍCIO COMO DETECTOR..... | 58 |
| 4.2.1 Características físicas..... | 60 |
| CAPÍTULO 5 | 63 |
| 5. CONCLUSÃO | 63 |
| 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 64 |
| REFERÊNCIAS | 65 |

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

“Numa estranha virada histórica, a ameaça de uma guerra mundial nuclear diminuiu, mas o risco de um ataque nuclear aumentou” – esta foi a fala do então presidente dos Estados Unidos, Barack Obama, num pronunciamento em Praga, em 2009 (COOPER; SANGER, 2009).

O contrabando de materiais radioativos e nucleares é um problema que vem sendo enfrentado pelas agências de inteligência e polícias do mundo todo desde a década de 1990 (APS, 2008). Em 1994, três contrabandistas portando 363,4 g de óxido de plutônio foram presos por policiais disfarçados de compradores no aeroporto de Munique, na Alemanha. Contendo 87% de plutônio-239, o material é considerado de alta pureza (IAEA, 2005). Casos anteriores já haviam acontecido, inclusive envolvendo quantidades maiores de material radioativo (IAEA ITDB, 2015). Porém, o que chama atenção nesse caso específico é que o material, além de ser enriquecido a proporções próximas às das utilizadas em armas nucleares (WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2018), efetivamente chegou ao aeroporto numa maleta num voo da Lufthansa vindo de Moscou, ou seja: os contrabandistas passaram pelos sistemas de segurança e embarcaram no avião sem problemas. Isso gera questionamentos acerca dos procedimentos de segurança e sistemas de detecção de materiais nucleares e radioativos em áreas de grande circulação de pessoas. Além disso, na época, o caso se tornou extremamente controverso. A inteligência alemã atribuiu o material a uma usina russa, enquanto a contra inteligência russa alegou que a situação teria sido armada pelo Serviço de Inteligência Alemão, que não permitiu que laboratórios russos recebessem amostras para realizarem seus próprios testes (MÜLLGES, 2014). O incidente culminou na criação de protocolos de segurança nuclear e na discussão sobre a criação de uma base de dados internacional que fornecesse informações sobre os materiais produzidos em diversos países para facilitar as investigações neste tipo de situação (IAEA ITDB, 2015)(MÜLLGES, 2014).

O Brasil não é um alvo típico de organizações terroristas, mas em 2014 o país foi sede da Copa do Mundo e, em 2016, o Rio de Janeiro sediou os Jogos Olímpicos e os Jogos Paraolímpicos. Nessas ocasiões, apesar de o Estado brasileiro não ser visto como um alvo, o território brasileiro recebe pessoas de nacionalidades alvo por organizações terroristas, o que

aumenta a necessidade de um programa adequado para prevenção e contenção de ataques, incluindo os de natureza radiológica e nuclear.

1.1 MOTIVAÇÃO PARA O DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

Durante muito tempo, a principal preocupação dos governos e das agências regulamentadoras foi a proteção radiológica, enquanto a segurança física de fontes radioativas ou nucleares foi negligenciada (IAEA ITDB, 2019). No entanto, após um grande número de incidentes registrados a partir da década de 90 (IAEA ITDB, 2019)(CNS, 2019), nasceu a necessidade não só de diretrizes e políticas mais rigorosas de controle de fontes, mas também de desenvolvimento de melhores equipamentos de detecção de radiação ionizante para atuarem em aeroportos, fronteiras, grandes eventos e outros locais que ofereçam risco à população (IAEA, 2011). Além disso, o fácil acesso a fontes comerciais faz com que, atualmente, ataques terroristas envolvendo fontes de radiação ionizante sejam uma preocupação crescente dos governos e polícias no Brasil e no mundo (CNS, 2019).

No ano de 2018, a Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA) promoveu dois eventos dedicados à segurança física e detecção de fontes radioativas e nucleares. Em abril, o *Second Technical Meeting on Radiation Detection Instruments for Nuclear Security: Trends, Challenges and Opportunities* (IAEA, 2018b), realizado na sede da IAEA em Viena, Áustria, teve como objetivo evidenciar novas tecnologias de detecção que possam ser usadas no combate ao contrabando de fontes (IAEA ITDB, 2019). Já em dezembro, ocorreu a *International Conference on the Security of Radioactive Material: The Way Forward for Prevention and Detection* (IAEA, 2018b), visando a troca de informações sobre a manutenção da segurança dos materiais radioativos que estão em situação regular durante o seu uso, transporte e armazenamento, bem como medidas para a detecção dos materiais que estão em situação irregular, ou seja: não estão sob o controle das leis e regras internacionais (IAEA ITDB, 2018a). Sendo a IAEA a maior autoridade global na área nuclear, a promoção desses eventos mostra a relevância do desenvolvimento de novos sensores detectores de radiação ionizante, como o avaliado neste trabalho.

Ainda, alguns trabalhos acadêmicos e não acadêmicos analisando o mesmo tipo de diodo e promovendo-os como uma alternativa simples e barata a contadores de radiação gama foram publicados (SANGEETA *et al*, 2015) (KHAZHURADOV, KOCHNEV, FEDORCHENKO,

2012) (OPENGEIGER, 2019) (KAINKA, 2001)(MAXIM, 2003). Contudo, muitos dos resultados apresentados, apesar de serem positivos para uso em laboratório, mostram-se não condizentes para aplicação em situações de campo.

O baixo número de materiais em português sobre segurança física e o uso malicioso de materiais radioativos e nucleares também motivou a reunião de informações relevantes nessa área baseada em extensa pesquisa em documentos de instituições consideradas referência em protocolos de segurança.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Geral

Avaliar a capacidade de um circuito utilizando diodo PIN como elemento detector, previamente desenvolvido na Universidade Tecnológica Federal do Paraná, em detectar radiação originária de fontes artificiais de raios X e do decaimento de isótopos radioativos. Com esses resultados, avaliar se o sistema pode ser aplicado como um equipamento auxiliar na segurança pública, como na interceptação de materiais sendo contrabandeados, transportados de maneira irregular e na recuperação de fontes radioativas fora do controle da regulamentação.

1.2.2 Objetivos específicos

Avaliar o funcionamento do sistema através da exposição do sensor a raios X de uso diagnóstico.

Avaliar a resposta do sensor quando exposto a radionuclídeos emissores de radiação gama.

Definir o perfil de resposta do sensor para fótons de diferentes energias.

Definir o padrão de resposta do sensor para feixes de raios X utilizando diferentes energias, correntes e tempos de exposição.

Considerar, a partir dos resultados obtidos, a possibilidade de transferência tecnológica.

No caso de não funcionamento, analisar as hipóteses que levam a esse comportamento.

1.3 ORGANIZAÇÃO

Este trabalho está organizado em 4 capítulos. O capítulo 1 apresenta a preocupação dos governos, polícias e agências reguladoras com incidentes, criminosos ou não, envolvendo materiais radioativos e nucleares no Brasil e no mundo. O capítulo 2 fornece uma fundamentação teórica e revisão bibliográfica sobre a ciência forense nuclear, a importância da detecção, física das radiações e diodos PIN. O capítulo 3 apresenta os materiais e a metodologia utilizada pra avaliar o funcionamento do sensor. O capítulo 4 apresenta os resultados e as discussões do trabalho. Finalmente, o capítulo 5 traz as conclusões do presente trabalho.

CAPÍTULO 2

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Segurança radiológica x Segurança física

Em inglês, os termos *safety* (segurança radiológica) e *security* (segurança física) se referem a dois aspectos diferentes da segurança de fontes e instalações radiológicas e nucleares. A segurança radiológica trata da proteção de indivíduos ocupacionalmente expostos, do público e do meio ambiente contra a exposição à radiação ionizante em condições normais de operação e em caso de acidente. Já a segurança física, foco deste trabalho, trata, de acordo com a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), da “prevenção, detecção e resposta a atos não autorizados criminais ou mal-intencionados” ...” que envolvam materiais e/ou radioativos e suas instalações e atividades associadas” (CNEN, 2019).

As bases da segurança física são formadas por três elementos fundamentais: prevenção, detecção e resposta (LOY J., 2011). O presente trabalho tem como foco o elemento da detecção, que tem papel fundamental na recuperação do controle da regulamentação sobre fontes que podem por em risco a população e o meio ambiente.

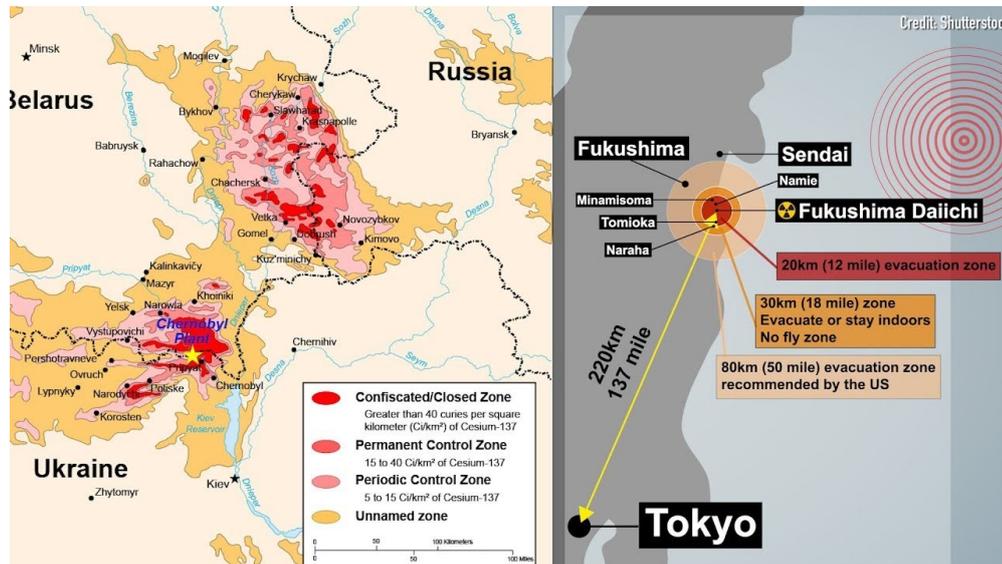
No Brasil, a segurança física de fontes radioativas e nucleares é regulamentada pela CNEN.

Terrorismo radiológico e nuclear

Existem três maneiras através das quais indivíduos mal-intencionados podem utilizar materiais radioativos ou nucleares em ataques terroristas. O primeiro deles é o mais óbvio: detonar uma bomba nuclear. O poder destrutivo de tal dispositivo é suficiente para destruir cidades inteiras.

O segundo é um ataque a uma instalação relacionada a atividades nucleares. Esse tipo de incidente é o menos provável, devido à alta segurança física empregada em tais instalações. Porém, caso ocorresse, o impacto em material, vidas, áreas contaminadas e custos para recuperação seria considerável (HOLDREN, 2007). Dois exemplos de zonas de exclusão de grandes proporções, comparáveis aos resultados de um ataque a instalações nucleares, são as de Prypiat, resultado do acidente em Chernobyl e Fukushima, no Japão (Figura 1).

Figura 1: zonas de exclusão resultantes dos acidentes com usinas nucleares em Chernobyl, Ucrânia, e Fukushima, Japão, logo após os acidentes.



Fonte: Shutterstock

Algumas dessas áreas já foram liberadas. Porém, algumas regiões, principalmente em Chernobyl, permanecerão inutilizáveis por centenas de anos.

Finalmente, o terceiro tipo de ataque é o dispositivo de dispersão radiológica (DDR). Nesse caso, um material que apresente decaimento radioativo é detonado junto a um artefato explosivo comum, dispersando o material e acarretando na contaminação de indivíduos e do meio ambiente. Apesar de ser raro, é o cenário de emergência mais provável, devido à facilidade com que se pode obter fontes radioativas comerciais (IAEA, 2004). Esse caso gera um menor impacto quando comparado a um artefato nuclear, sendo os principais danos relacionados à explosão em si. Mesmo gerando uma zona de exclusão, o que acarreta impacto econômico e social na região afetada, o principal objetivo de um DDR é o efeito psicológico do pânico, arma frequente dos terroristas (HOLDREN, 2007), levando a hospitais superlotados e distúrbios civis.

O acidente radiológico de Goiânia, o pior já registrado na história, é um exemplo das consequências que a explosão de um DDR teria. Apesar de apenas quatro mortes, 249 pessoas foram contaminadas, os terrenos na rua 57 foram inutilizados, mais de 6 mil toneladas de rejeito radioativo foram geradas e centenas de pessoas foram envolvidas na operação de descontaminação (Figura 2), incluindo 369 membros de equipes técnicas e cerca de 300 membros de equipes de apoio, como Forças Armadas, universidades, voluntários, entre outros (CNEN, 1988)(BARATA, 2017).

Figura 2: centenas de pessoas foram envolvidas na operação de descontaminação após o acidente com o Cs-137 em Goiânia



Fonte: Divulgação (1987)

Além disso, o pânico se instalou entre parte da população da cidade. Um dos exemplos disso foi o tumulto e o apedrejamento do caixão de Leide das Neves Ferreira, menina símbolo da tragédia, durante seu sepultamento (GOIÁS24HORAS, 2017).

2.1 IMPORTÂNCIA DA DETECÇÃO NA SEGURANÇA FÍSICA

A grande maioria das fontes de radiação ionizante existentes está sob o controle adequado da regulamentação. Contudo, mesmo em países desenvolvidos e com políticas públicas e sistemas regulatórios avançados, ocorrem, todos os anos, incidentes com fontes órfãs (IAEA, 2005). Isso mostra que ainda existem lacunas que precisam ser preenchidas nas diversas fases do ciclo de vida dos materiais radioativos e nucleares.

MORC

O termo MORC, do inglês *material out of regulatory control*, é definido como um material nuclear ou radioativo que se encontra fora do controle da regulamentação.

Fontes órfãs

Fontes órfãs são fontes radioativas que, de alguma maneira, acabam fora do controle da regulamentação – seja por perda, roubo, transferência não autorizada ou até mesmo abandono

pelo responsável legal (Figura 3). O termo também se aplica a fontes que nunca estiveram regulamentadas (IAEA, 2011).

Figura 3: câmara de radiografia industrial em situação de abandono



Fonte: IAEA (2016)

O acidente radiológico de Goiânia é, também, um exemplo de ocorrência envolvendo uma fonte órfã, já que a fonte de gamagrafia contendo Cs-137 estava sob situação de negligência por parte do responsável (Figura 4). Na época, não havia legislação específica sobre crimes envolvendo materiais radioativos, apenas a Lei nº 6.453/77, que legisla sobre materiais nucleares. Assim, os médicos e o físico responsável pela clínica, assim como o dono do prédio onde ela se encontrava, foram punidos criminalmente por lesão corporal (SOARES, 1997). As penas foram, posteriormente, extintas.

Figura 4: Cabeçote da bomba que continha do Cs-137 em Goiânia.



Fonte: CNEN (1987)

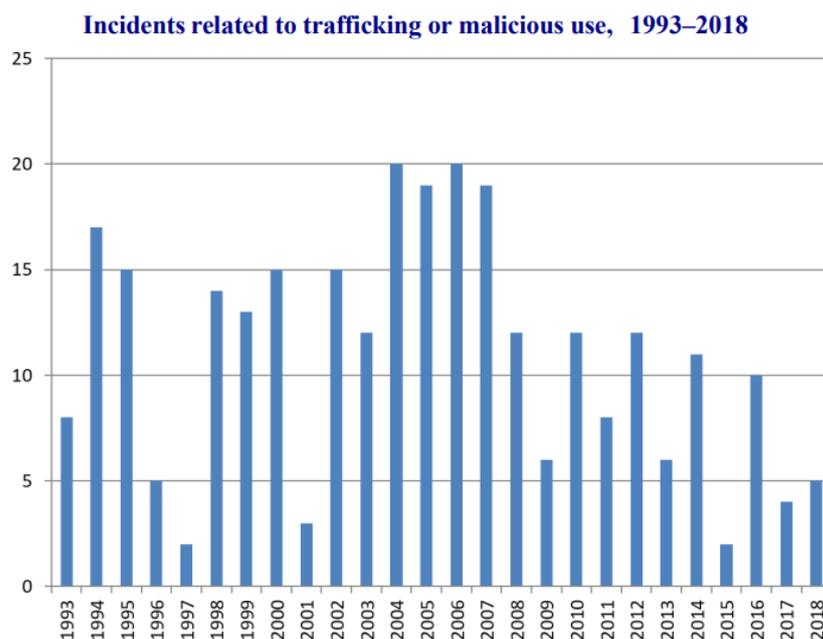
Incidentes

Um incidente radiológico ou nuclear é todo e qualquer evento que leve à perda do controle normal da regulamentação sobre um material radioativo ou nuclear que possa levar à exposição de indivíduos e do meio ambiente à radiação (IAEA, 2018c).

A IAEA mantém, desde 1995, uma plataforma de registros de incidentes e atividades ilícitas envolvendo MORCs, a *IAEA Incident and Trafficking Database (ITDB)*. Esses dados cobrem todo o tipo de material nuclear definido pelo estatuto da IAEA (urânio, plutônio e tório), radioisótopos naturais e artificiais, e materiais contaminados por radiação, como ferro velho (IAEA ITDB,2019) e são importantes tanto para encorajar os Estados a melhorarem a fiscalização sobre suas fontes como para aprender com os incidentes passados.

O relatório mais recente da ITDB (IAEA ITDB,2019) traz os dados dos incidentes entre 1993 e 2018. Em 2018, até 31 de dezembro, 253 incidentes foram reportados por 49 países diferentes. O número total de incidentes desde 1993 é de 3497. Desses, 285 têm evidências suficientes para serem ligados a atividades maliciosas (Figura 5), em 965 não havia informação suficiente para determinar a natureza da ilicitude e 2247 não tinham relação com tráfico ou uso malicioso. Cabe ressaltar, contudo, que esses números vêm apenas de países participantes da IAEA.

Figura 5- Dos 3497 incidentes reportados à ITDB até 2018, 285 incidentes tem evidências suficientes para serem ligados a atividades maliciosas

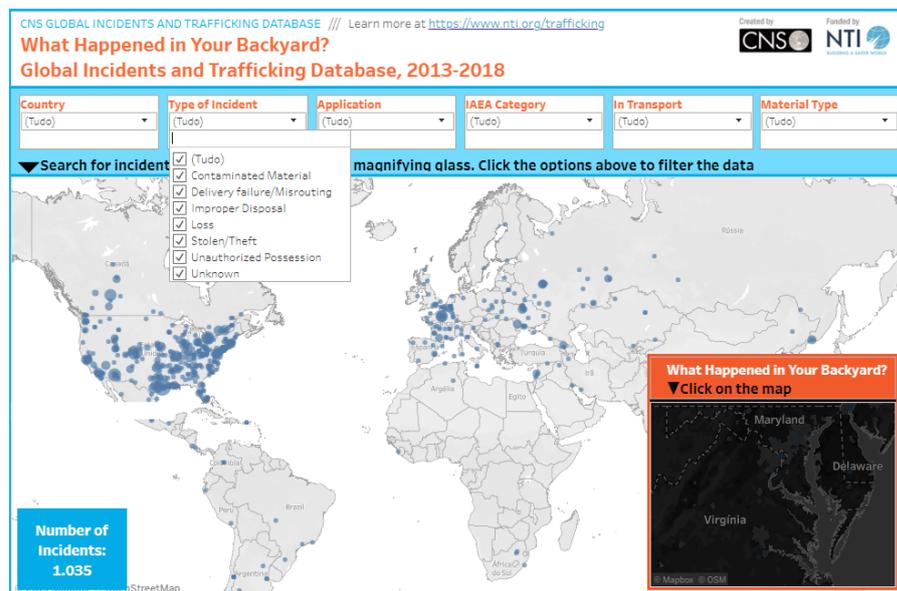


Fonte: IAEA ITDB (2019)

Esses números mostram que, apesar de existirem regulamentações nacionais e internacionais quanto à segurança física das fontes e o número de casos ter diminuído na última década, ainda há lacunas no ciclo de vida dessas fontes que permitem que, por atos criminosos ou apenas negligência, elas saiam do controle da regulamentação.

A *CNS James Martin Center for Nonproliferation Studies* também mantém a sua base de dados, a *CNS Global Incidents and Trafficking Database* (CNS, 2019). Nela, é possível, inclusive, navegar por um mapa que mostra os tipos de incidente por localidade, como mostrado na figura 6:

Figura 6: Captura de tela da CNS Global Incidents and Trafficking Database. A base de dados da CNS mostra incidentes de diferentes categorias no cenário mundial.



Fonte: NTI (2019)

Ciência forense nuclear

A ciência forense nuclear é uma área de estudo relativamente nova, que surgiu da necessidade não só de identificar MORCs, mas também de compreender suas origens e qual o seu uso pretendido (WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2018), com o objetivo de evitar futuros incidentes de mesma natureza. Quando um material suspeito é interceptado, várias perguntas devem ser respondidas durante a investigação. Para isso, o processo pode ser dividido em cinco fases: categorização, análise forense, caracterização, interpretação forense nuclear e atribuição (JAKUBIAK *et al*, 2019).

A categorização consiste na análise do grau de ameaça imprimido por determinada ocorrência, tanto às equipes de atendimento emergencial quanto ao público, assim como prever se há crime e ameaça segurança nacional. A magnitude da ameaça pode variar, desde contaminação ambiental e risco à saúde e segurança públicas, até a proliferação (IAEA, 2005). A detecção tem um papel fundamental nesse processo e é partir disso que o Estado deve determinar qual a resposta adequada.

2.2 ONDAS ELETROMAGNÉTICAS E EMISSÃO DE RADIAÇÃO

Para entender como a radiação interage com o meio, é necessário compreender os fundamentos básicos do processo pelo qual ela é originada e como a energia carregada pelas ondas se relaciona com meios materiais. Dessa maneira, é possível avaliar quais tipo de materiais, dispositivos ou sistemas oferecem ou não riscos para a saúde das pessoas e ao meio ambiente.

As ondas eletromagnéticas são capazes de se propagar em vários meios, sejam eles materiais ou no vácuo. Elas têm como origem ajustes de cargas elétricas em determinado sistema. Após originadas, carregam um fluxo irreversível de energia para longe da fonte - para onde não é possível retornar (GRIFFITHS, 2012). A esse processo dá-se o nome de irradiação, e a energia carregada pelas ondas é a radiação.

Numa análise voltada ao trabalho proposto, considera-se como fonte uma carga pontual localizada no centro de uma casca esférica de raio r . O vetor de Poynting representa a quantidade de energia transferida por unidade de área (equação 1).

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}, \text{ onde } \vec{H} = \frac{1}{\mu_0} \vec{B} \quad (1)$$

onde \vec{S} é o vetor de Poynting (W/m^2), \vec{E} é o vetor campo elétrico, \vec{H} é o campo magnético, \vec{B} é o vetor indução magnética e μ_0 é a permeabilidade magnética no vácuo.

Na sua forma integral, \vec{P} é a potência total que passa pela casca. Ela é dada pela integral de área do vetor de Poynting (equação 2):

$$\vec{P}(\vec{r}) = \oint \vec{S} \cdot d\vec{a} = \frac{1}{\mu_0} \oint \vec{E} \times \vec{B} \cdot d\vec{a} \quad (2)$$

Do ponto de vista clássico, pode-se analisar o sistema tanto da perspectiva da eletrostática, onde as cargas se encontram estacionárias ou a densidade de carga em uma determinada região se mantém constante (GRIFFITHS, 2012), quanto da eletrodinâmica, quando há diferença de densidade de carga em uma determinada região do espaço.

Na eletrostática, tanto a lei de Coulomb (equação 3) quanto a lei de Biot-Savart (equação 4) descrevem um decréscimo dos campos em função da distância na forma $1/r^2$,

$$\vec{F}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qQ}{r^2} \hat{r} \quad (3)$$

$$\vec{B}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} J \int \frac{d\vec{l}' \times \hat{r}}{r^2} \quad (4)$$

onde q e Q descrevem cargas distintas e J é a densidade de corrente que gera o campo magnético.

Nestas condições, \vec{S} é da ordem de $1/r^4$. Contudo, considerando que a energia irradiada vai para longe da fonte de maneira irreversível, a potência irradiada pelo sistema é dada quando $r \rightarrow \infty$. Assim, como a área da esfera é $A = 4\pi r^2$, para que haja emissão de radiação, \vec{S} não pode decair mais rápido do que $1/r^2$. Conclui-se, então, que cargas estacionárias não emitem radiação (GRIFFITHS, 2012).

A situação mais comum em que a radiação é emitida de maneira constante é quando partículas carregadas atingem um átomo. Como já deduzido anteriormente, se ocorre uma colisão, a partícula sofre aceleração, emitindo radiação como consequência (JACKSON, 1998). No caso de radiações ionizantes, a radiação tem origem em processos como efeito Compton, produção de pares, entre outros. Para esses casos, os campos elétrico e magnético são descritos como generalizações da lei de Coulomb e da lei de Biot-Savart, as equações de Jefimenko (equações 5 e 6):

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int \left[\frac{\rho(\vec{r}', t_r)}{r^2} \hat{r} + \frac{\dot{\rho}(\vec{r}', t_r)}{cr} \hat{r} - \frac{\vec{j}(\vec{r}', t_r)}{cr} \right] d\tau' \quad (5)$$

$$\vec{B}(\vec{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \left[\frac{\vec{j}(\vec{r}', t_r)}{r^2} + \frac{\dot{\vec{j}}(\vec{r}', t_r)}{cr} \right] \times \vec{r}' d\tau' \quad (6)$$

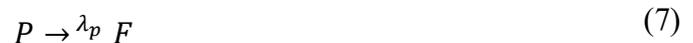
Onde c é a velocidade da luz, $\rho(\vec{r}', t_r)$ é a densidade da carga num ponto r num tempo retardado t_r (tempo em que a informação deixa a fonte) e τ' é o tempo não retardado.

Ambos os campos dependentes do tempo incluem termos que variam a $1/r$, ou seja: a potência irradiada pelo sistema decai na ordem de $1/r^2$, da ordem de grandeza de r . Assim, mesmo para r muito grandes, eles são os responsáveis pela emissão de radiação eletromagnética.

Esse mecanismo tem papel importante na compreensão de fenômenos que serão abordados na sessão 2.3.1, como o *brehmstrahlung*, ou radiação de frenamento. Ainda, se uma partícula carregada interagir com um alvo ao anteparo, ela por um processo de aceleração/desaceleração e , conseqüentemente, emite radiação (JACKSON, 1998). Esse é o princípio da produção de raios X num tubo de raios X.

2.2.1 Radioatividade

Quando um átomo é instável, ele tende a sofrer transições energéticas em sua estrutura nuclear para atingir um estado mais estável. Dessa maneira, a radioatividade é determinada pela transformação de um núcleo instável em um mais estável, como descrito na equação 7:



onde P é um núcleo pai que decai, através de uma constante de decaimento λ_p , em um núcleo filho F (PODGORSK, 2005).

Esse processo de balanço energético é atingido através da emissão de partículas com energias determinadas pela natureza das interações do núcleo. Pode haver uma série de decaimentos até que o núcleo se torne totalmente estável, podendo levar até milhões ou bilhões de anos, como no caso do U-238.

Atividade

A atividade $A(t)$ (equação 8) de uma substância radioativa em determinado tempo t é uma característica intrínseca do material e é definida como o produto da sua constante de decaimento λ e do número de núcleos radioativos presentes (PODGORSK, 2005):

$$A(t) = \lambda N(t) \quad (8)$$

Assim, respeitando-se a constante de decaimento, devido à dependência com o tempo, quanto maior o tempo decorrido, menor a atividade do material. Essa informação é de grande importância na fase de categorização da investigação forense nuclear, pois auxilia na determinação do perigo oferecido por determinado material à população e ao meio ambiente. Ela também pode ser escrita em função da meia vida, como descrito a seguir.

Meia vida

O período de meia vida de um material radioativo $t_{1/2}$ é definido como o tempo em que o número de núcleos radioativos N leva para decair até a metade do seu valor inicial em um instante de tempo $t = 0$. Ele tem forma exponencial e é dado pela equação 9:

$$N_{t_{1/2}} = \frac{1}{2} N(0) = N(0) e^{-\lambda_p t_{1/2}} \quad (9)$$

Onde $N(0)$ é o número inicial de núcleos no tempo $t = 0$, $N_{t_{1/2}}$ é o número de núcleos após o período de meia vida e λ_p é a constante de decaimento do material.

Assim como a atividade, a meia vida de um material é uma grandeza de grande importância na fase de categorização de um incidente envolvendo materiais radioativos ou nucleares. Ela determina a estimativa do tempo em que uma determinada área pode ficar contaminada em função do tipo de radioisótopo presente.

A atividade de uma determinada quantidade de um radionuclídeo em um estado energético específico em função da sua meia vida é dada pela equação 10:

$$A = \frac{dN}{dt} = \lambda N = \left[\left(\frac{\ln 2}{t_{1/2}} \right) \right] N \quad (10)$$

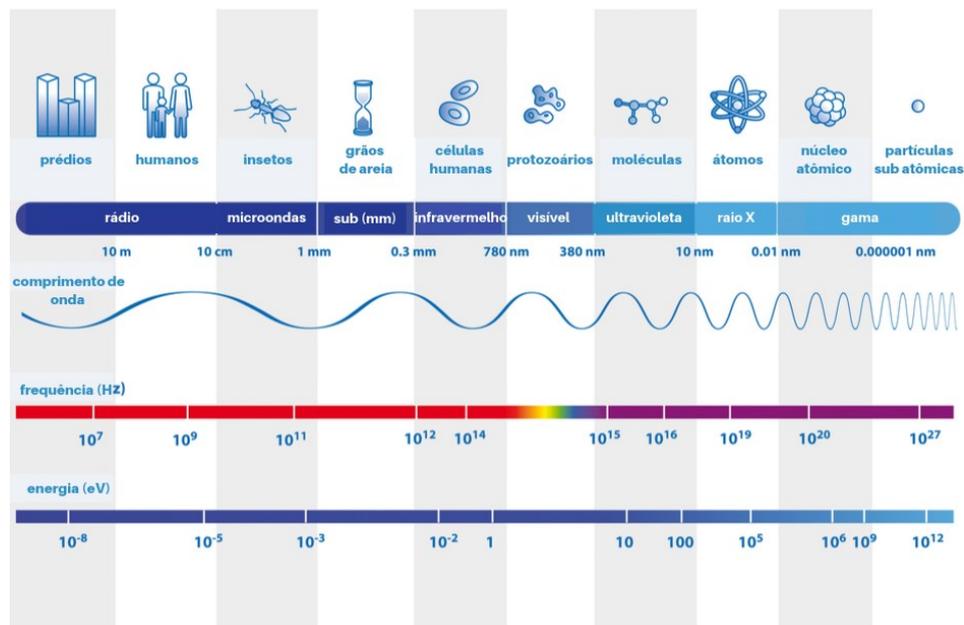
onde dN é o número de transformações nucleares espontâneas do estado energético em um estante de tempo dt .

A unidade da atividade é o s^{-1} , ou bequerel (Bq), onde 1 Bq representa uma desintegração nuclear por segundo. Ela pode ser relacionada com a antiga unidade para atividade, o Ci (que era definida em função da atividade de 1 g de Ra-226): $1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$ (PODGORSK, 2005). As atividades de alguns materiais estudados neste trabalho estão exemplificadas na sessão de Materiais.

2.3 INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO COM A MATÉRIA

Pode-se dividir radiações do espectro eletromagnético em duas categorias: não-ionizantes e ionizantes. Essa classificação está diretamente ligada à energia das ondas/partículas emitidas e à sua consequente capacidade de ionizar a matéria. Um esquema do espectro eletromagnético mostrando a relação entre energia e frequência das radiações eletromagnéticas é apresentado na figura 7:

Figura 7: Espectro eletromagnético exibindo faixas de comprimento de onda (com exemplos de dimensões comparáveis), frequência e energia.



Fonte: adaptado de Stanford Solar Center (2019)

O potencial de ionização de um átomo é definido pela energia mínima necessária para ionizar um átomo. Esse valor varia de alguns eletrons para elementos alcalinos até 24.5 eV para o hélio (PODGORSK, 2005).

Dentre as radiações ionizantes, ainda há duas subclassificações:

Ionização direta

A ionização direta se dá quando uma partícula carregada interage com um meio. Esse é o caso de elétrons, prótons, partículas alfa e íons pesados. Ao interagir com um meio material, a partícula carregada interage diretamente com os elétrons orbitais dos átomos do meio por interação Coulombiana (PODGORSK, 2005).

Ionização indireta

Já a ionização indireta ocorre quando radiações neutras, como fótons e nêutrons, incidem num meio material. Como não são carregadas, essas radiações não estão sujeitas às forças coulombianas. Consequentemente, para serem detectadas, é necessário que, ao incidir no meio, a radiação sofra uma mudança drástica em sua natureza inicial (KNOLL, 2001,). Na primeira interação, a partícula incidente deposita energia no meio, liberando partículas carregadas através de mecanismos que serão abordados na sessão 2.3.1. Caso essa primeira interação não ocorra, é possível que a radiação passe completamente pelo volume do sensor sem ser detectada (KNOLL, 2001). Ocorrendo interação, os fótons, que são responsáveis pelas interações estudadas neste trabalho, liberam elétrons e pósitrons. Nêutrons liberam prótons e íons pesados.

Num segundo momento, essas partículas carregadas secundárias interagem com os elétrons orbitais dos átomos no meio (PODGORSAK, 2005). Por isso, dizemos que as responsáveis pela deposição de dose no meio, por exemplo, são as ionizações secundárias.

2.3.1 Características das radiações

As radiações estudadas neste trabalho são de caráter indireto: raios X e raios gama. Em ambos os casos, a energia é transportada na forma de fótons.

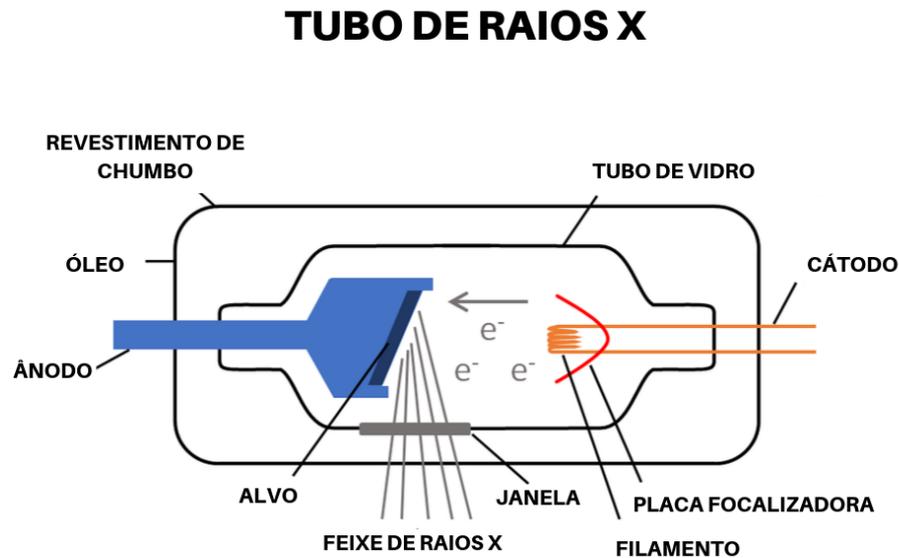
Raios X

Raios X são uma radiação de caráter neutro, emitido na forma de fótons, com energias que vão tipicamente de 100 eV até 100 keV. Os fótons nessa faixa do espectro têm origem em dois processos: *brehmsstrahlung*, ou radiação de freamento, e os raios X característicos.

Num tubo de raios X, os elétrons são acelerados entre um eletrodo e um alvo com polaridades diferentes. Essa diferença de potencial gera um campo elétrico entre os eletrodos. Ao atravessarem as linhas de campo, os elétrons ganham energia cinética na proporção de 1 eV por linha de campo - se uma tensão de 100 V for aplicada, a energia máxima do elétron será de 100 keV, por exemplo. No *brehmsstrahlung*, ao atingirem o alvo, os elétrons são desacelerados por ação da força coulombiana e a energia cinética perdida é emitida em forma de fótons de raios X, como citado na sessão 2.2.

O esquema da produção de raios X pode ser visualizado na figura 8.

Figura 8: Esquema de um tubo de produção de raios X.



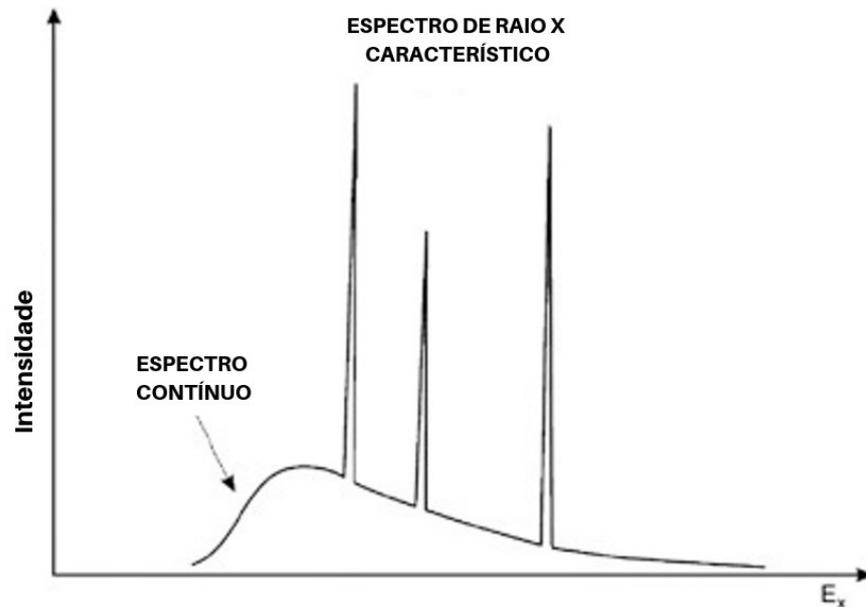
Fonte: adaptado de FRCR Physics Notes (2019)

Diferentemente dos raios gama, o espectro emitido pelos raios X de freamento é contínuo, mesmo para feixes de elétrons acelerados monoenergéticos, pois a energia é dependente de uma sequência de eventos desde a saída do cátodo até a chegada no detector.

Já os raios X característicos são provenientes de ajustes energéticos nas camadas eletrônicas dos átomos. Se algum processo gera excitação nos elétrons orbitais ou faz com que algum elétron seja ejetado da camada que ocupa, um elétron de um nível superior de energia irá ocupar a vacância deixada pelo primeiro elétron. Ao transitar de um estado excitado mais energético para um menos energético ou para o estado fundamental, dependendo da diferença de energia entre os estados, os elétrons podem emitir radiação eletromagnética em forma de um fóton de raio X característico. Em materiais sólidos, esse processo ocorre, tipicamente, dentro de 1 ns. A energia do fóton emitido é quantizada e igual à diferença entre os níveis de energias inicial e final, exibindo um espectro discreto (KNOLL, 2001)(PODGORSK, 2005).

Dessa maneira, o espectro da radiação gerada num tubo de raios X tem uma componente contínua devido ao *brehmsstrahlung* e uma componente discreta devido aos raios X característicos, como pode ser visto na figura 9.

Figura 9: Espectro dos raios X emitidos após a colisão de elétrons acelerados. Neste trabalho, a porção contínua do espectro é mais relevante.



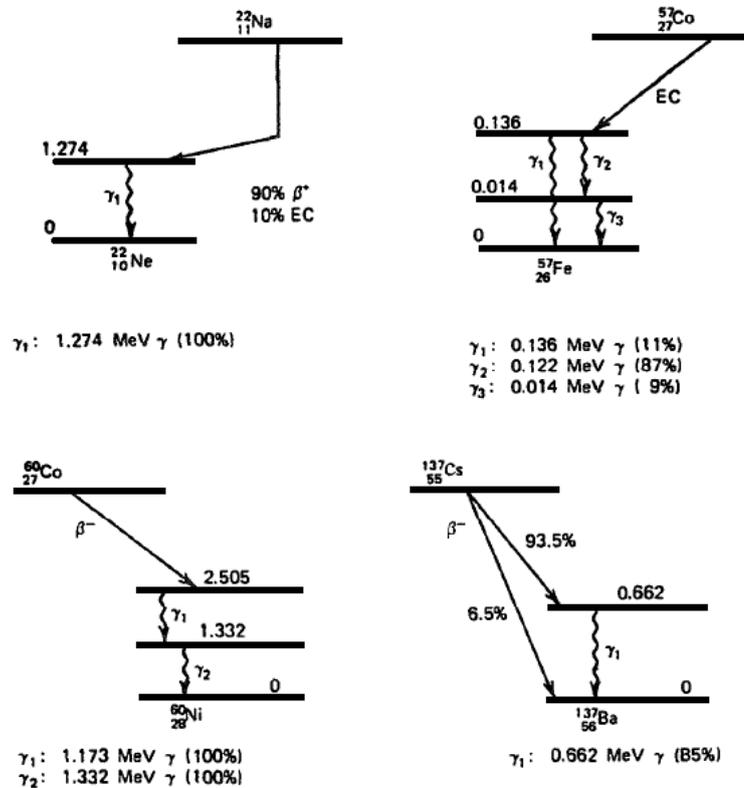
Fonte: adaptado de (KNOLL, 2001)

Raios gama

Raios gama são provenientes de transições nucleares durante o processo de decaimento de núcleos excitados. Em geral, um decaimento no núcleo pai leva ao preenchimento de um estado excitado na espécie filha. Esse estado é, posteriormente, desocupado através da emissão de um fóton raio gama. Devido à estrutura de bandas do núcleo atômico, a energia desses fótons é quantizada – cada uma das transições tem energias bem definidas, cujo valor é a diferença entre o estado excitado e o estado menos excitado ou fundamental (KNOLL, 2001). Essas energias são, em geral, da ordem de MeV, já que os núcleos estão sujeitos à força nuclear forte. A figura 10 mostra o esquema dos decaimentos mais abundantes em quatro fontes comuns de radiação gama.

Os raios gama apresentam especial risco à saúde das pessoas. Como altas energias, os fótons são capazes de penetrar em profundidade considerável inclusive em materiais de alta densidade, como o chumbo. Eles penetram ou atravessam os tecidos humanos com facilidade, podendo depositar doses significativas em órgãos internos sem a necessidade de inalação ou ingestão (IAEA, 2004).

Figura 10: Níveis de energia e esquema de decaimento do Na-22, Co-57, Co-60 e Cs-137. As respectivas energias dos fótons gama emitidos por cada material são relacionadas. Abaixo de cada imagem, as probabilidades de cada energia de emissão são relacionadas.



Fonte: adaptado de (KNOLL, 2001)

Também existem os raios gama produzidos por aniquilação de pares e por reações nucleares. Porém, a maioria das fontes de interesse deste trabalho obedecem ao modelo tratado acima.

2.3.2 Interações dos fótons com a matéria

Existem diversos efeitos decorrentes da interação das radiações ionizantes com a matéria. No caso da interação de fótons na faixa energética estudada com um meio, a transferência de energia se dá por três mecanismos: efeito fotoelétrico, efeito Compton e produção de pares. Cada um é dependente tanto da energia da radiação incidente como das características de absorção do meio e resulta na transferência completa ou parcial da energia do fóton para elétrons do meio (KNOLL, 2001), como é visto a seguir.

Efeito fotoelétrico

No efeito fotoelétrico, um fóton de energia $h\nu$ interage com um meio absorvedor e ejeta um elétron fortemente ligado, de energia de ligação E_b . Esse elétron recebe o nome de fotoelétron e sua energia E_e é dada pela equação 11:

$$E_e = h\nu - E_b \quad (11)$$

Nesse processo, o fóton incidente desaparece completamente, transferindo a maioria da sua energia para o fotoelétron ejetado.

Caso o fóton tenha energia suficiente, a maior probabilidade de interação é com elétrons da camada K do átomo. Ao deixar a camada, o elétron deixa uma vacância no estado que ocupava originalmente. Essa vacância é, subsequentemente, preenchida por um elétron do meio ou de uma camada de energia superior. Alguns raios X característicos podem ser gerados nesse processo e, apesar de a maioria ser rapidamente reabsorvida no processo, alguns podem escapar, influenciando na resposta de detectores (KNOLL, 2001).

O efeito fotoelétrico tem forte dependência com o número atômico do material absorvedor e é o principal efeito para raios X ou gama de baixa energia. Sua probabilidade de interação com um meio τ é dada, aproximadamente, pela equação 12:

$$\tau \cong \text{constante} \times \frac{Z^n}{E_\gamma^{3.5}} \quad (12)$$

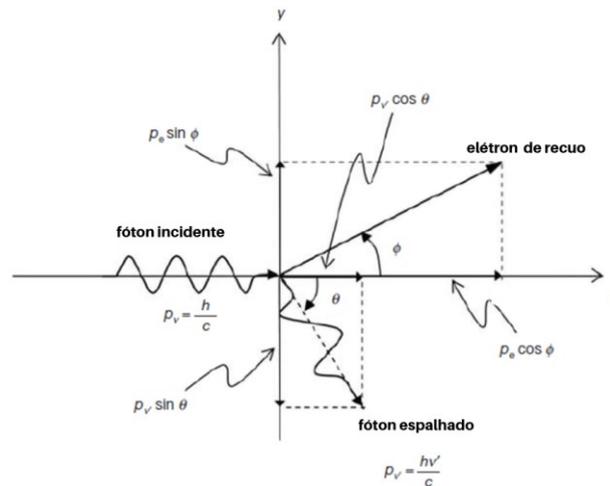
Efeito Compton

O efeito Compton é o mecanismo de interação predominante para fótons gama na faixa exérgica emitida por radionuclídeos. Ele consiste na interação de um fóton de energia $h\nu$ com um elétron orbital de um meio, sendo $h\nu$ maior do que a energia de ligação do elétron orbital. O fóton incidente é defletido em um ângulo θ e transfere parte da sua energia cinética inicial para o elétron, que passa a ser chamado de elétron de recuo. (PODGORSAK, 2005). A energia do fóton espalhado é dada pela equação 13:

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_0c^2}(1 - \cos \theta)} \quad (13)$$

Dependendo do ângulo θ , a energia transferida pode variar de zero a uma grande porção da energia inicial do fóton incidente (KNOLL, 2001). A figura 11 mostra um diagrama esquemático do processo.

Figura 11: no efeito Compton, um fóton incidente interage com um elétron orbital do material. O fóton é defletido num ângulo θ e transfere parte de sua energia cinética para o elétron.



Fonte: adaptado de (KNOLL, 2001)

2.3.3 Grandezas relevantes

Algumas grandezas são fundamentais na avaliação de risco durante um incidente radiológico ou nuclear.

Exposição

A exposição X é dada pela razão entre o valor absoluto da carga total dos íons de um sinal produzidos no ar (dQ) quando todos os elétrons e pósitrons secundários criados pela interação dos fótons numa massa dm de ar são completamente parados também no ar (PODGORSAK, 2005). Ela é dada pela equação 14:

$$X = \frac{dQ}{dm} \quad (14)$$

A unidade da exposição no Sistema Internacional de Unidades (SI) é C/kg, mas também pode ser expressada em roentgen R, onde $1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$. Essa definição é válida para o ar e apenas para fótons, ou seja, raios X ou gama. Apesar de não ser ligada a nenhum fenômeno físico, a exposição é útil para estimar a taxa de exposição (R/h) da uma distância conhecida de determinada fonte (KNOLL, 2001).

Dose absorvida

A dose absorvida D é definida como a quantidade de energia média depositada num meio por determinada radiação ionizante e pode ser dada pela equação 15:

$$D = \frac{d\bar{\mathcal{E}}}{dm} \quad (15)$$

Onde \mathcal{E} é a soma de todas as energias entrando o volume V de interesse menos toda energia que deixa o volume; e m é a massa da matéria em V .

A unidade no SI é J/kg e é chamada de Gray (Gy). $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$, unidade antiga para dose absorvida.

Dose equivalente

Diferentes tipos de radiação interagem de maneiras diferentes com tecidos biológicos distintos. Como exemplo, o dano causado por uma dose absorvida de 1 Gy de partículas alfa é diferente de 1 Gy de raios gama. A dose equivalente H_T é dada pela dose absorvida pelos tecidos $D_{T,R}$ multiplicada por um fator ponderação w_R , que considera a maneira como determinado tipo de radiação interage (R) com tecidos biológicos (T) para estimar seu potencial ofensivo (equação 16) (IAEA, 2004):

$$H_T = \sum_R w_R \times D_{T,R} \quad (16)$$

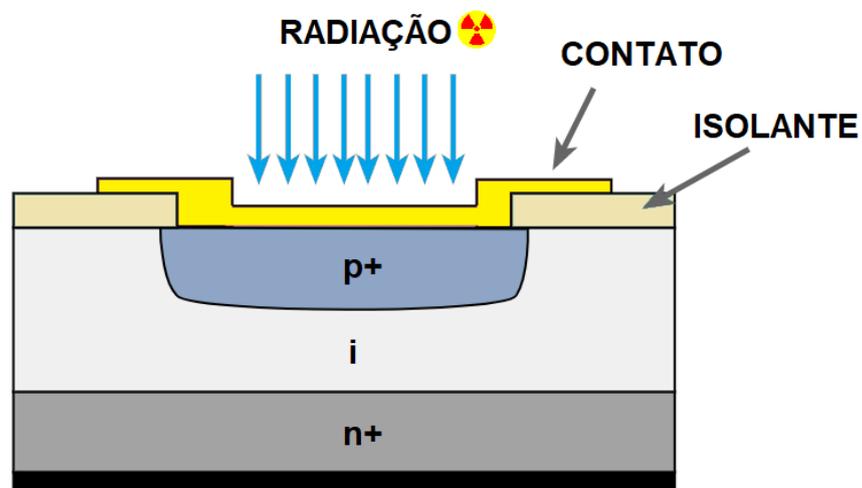
A dose equivalente também é J/kg, chamada de Sievert (Sv).

2.4 DIODO PIN

Diodos semicondutores de junção PIN (*positive-intrinsic-negative*) podem ser utilizados na detecção de fótons de raios X e raios gama (KNOLL, 2001).

Enquanto um diodo *p-n* é uma junção entre um semiconductor dopado positivamente (p) e um semiconductor dopado negativamente (n), o diodo PIN apresenta ainda uma fina camada de material de alta resistividade entre eles, chamada de região intrínseca (i) (Figura 12).

Figura 12: diagrama esquemático de um diodo PIN



Fonte: adaptado de Electronics Notes (2019)

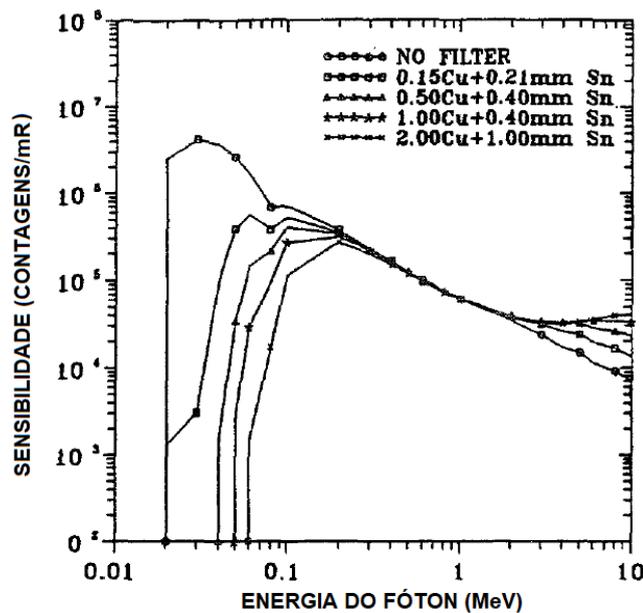
Essa camada possui um baixo número de impurezas e contribui para o aumento da zona de depleção no dispositivo, disponibilizando um volume maior de semiconductor para a interação com os fótons - o que aumenta a sua sensibilidade. Além disso, a região intrínseca minimiza os danos permanentes causados por radiações de altas energias, como nêutrons (SOLID STATE DEVICES, 2011).

Quando os fótons de raios X ou gama atingem a área sensível do diodo, a energia transferida faz com que elétrons da banda de valência sejam promovidos à banda de condução, deixando uma lacuna na banda de valência, ou seja - produz éxcitons (pares elétron-buraco) entre a banda de valência e a banda de condução (KNOLL, 2001). As cargas difundem então pela zona de depleção, impulsionadas pelo campo elétrico decorrente da polarização reversa, e

geram uma corrente de portadores minoritários na direção reversa do diodo, chamada de fotocorrente. Essa fotocorrente é então coletada pelos eletrodos. O pequeno número de pares elétron buraco criados faz com que o sinal tenha que ser amplificado para que seja distinguido do ruído (KNOLL, 2001).

Uma das vantagens de utilizar um diodo PIN como monitor pessoal é a possibilidade de leitura simultânea. Já um dos desafios de utilizar o diodo PIN como medidor de radiação gama é que a sensibilidade de um diodo diminui em várias ordens de grandeza à medida que a energia do fóton incidente aumenta, como pode ser visto na figura 13. Uma solução possível é o uso de filtros metálicos.

Figura 13: Gráfico mostrando a dependência da sensibilidade calculada de um diodo com várias espessuras de filtros de cobre em relação à energia dos fótons incidentes na área sensível do dispositivo.



Fonte: C-R. Chen et al., 1993 *apud* (KNOLL, 2001)

Conseqüentemente, uma das grandes preocupações em sistemas para detecção de raios gama é um baixo ruído.

Em teoria, a resposta de um diodo semiconductor deveria ser proporcional, ou seja: cada fóton incidente deveria resultar em uma contagem. Contudo, o comportamento real desses dispositivos é bem diferente, já que a probabilidade de registrar uma contagem não se relaciona diretamente com a dose depositada pelo fóton (KNOLL, 2001).

CAPÍTULO 3

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta os materiais e a instrumentação utilizados nos procedimentos de exposição e medição, assim como a metodologia aplicada para obter os resultados e conclusões apresentados nos próximos capítulos.

O sistema utilizando diodo PIN foi exposto a feixes de raios X e a fontes emissoras de radiação beta e gama com o objetivo de avaliar, de maneira quantitativa e qualitativa, a amplitude, o perfil e a linearidade da resposta fornecida. Em função dessa resposta, é possível realizar uma primeira avaliação de se o sistema, em seu estado de desenvolvimento atual, é ou não adequado para a utilização como um detector de radiação ionizante auxiliar nos procedimentos de segurança física e recuperação de fontes órfãs.

Não houve custos em nenhuma das etapas de medição, sendo os gastos resumidos aos materiais utilizados previamente na construção do circuito, que são abordados nas sessões seguintes.

3.1 MATERIAIS

Esta sessão apresenta os materiais utilizados em todas as fases dos experimentos, divididos em emissores de raios X, fontes, instrumentos de medição, diodos, configuração do sistema e outros materiais.

3.1.1 Emissores de raios X

Raytech

As exposições com o aparelho de raios X foram realizadas com o sistema Raytech modelo US 30/50 (São Paulo, SP, BR) e colimador RAY TEC CML/24V (São Paulo, SP, BR), no Laboratório de Radiações Ionizantes do Departamento Acadêmico de Física (DAFIS) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

XRS-3

Também foram realizadas exposições qualitativas com o aparelho de raios X utilizado pelo Esquadrão Antibombas (EAB) da Polícia Militar do Paraná.

O XRS-3 (Figura 14) é um gerador industrial que produz raios X com fótons de energia máxima de 270 kVp até 99 pulsos em 6,6 s (GOLDEN ENGINEERING, 2017) e é utilizado pelos técnicos explosivistas para averiguar objetos suspeitos de conter artefatos explosivos durante o atendimento de ocorrências (EAB).

Figura 14: Gerador industrial XRS-3 utilizado pelo EAB da PMPR.



Fonte: Vidisco (2017)

3.1.2 Fontes

Três tipos de fonte foram avaliados durante os procedimentos experimentais:

Fontes didáticas

No primeiro ciclo de medições, foram analisadas fontes didáticas de baixa intensidade Isotrak cedidas pelo Laboratório de Pesquisa em Imagens Médicas da UTFPR (LAPIM) (figura 15). Esse tipo de fonte é selado e desenvolvido de modo que permite a realização de experimentos de detecção, porém minimizando o risco ao operador (ECKERT&ZIEGLER, 2019). De acordo com o manual das fontes, a atividade nominal na data de 08/04/2012 era de 74 kBq (2,0 μ Ci). Antes do início dos testes, as fontes foram analisadas utilizando um contador Geiger para que fosse confirmada a sua atividade. As características dos materiais das fontes didáticas constam na Tabela 1.

Figura 15: Fontes didáticas Isotrak

Fonte: O autor (2018)

Tabela 1- Características das fontes didáticas

| Fonte | Energia de emissão | Meia-vida (anos) |
|--------|---|------------------|
| Am-241 | $\gamma_1 = 59,5 \text{ keV}$ | 432 |
| Na-22 | $\gamma = 2,842 \text{ MeV}$ | 2,63 |
| Sr-90 | $\beta: 320 \text{ keV}$ $\beta: 320 \text{ keV}$ | 29,1 |
| Co-60 | $\gamma_1 = 1,17 \text{ MeV}$ $\gamma_2 = 1,33 \text{ MeV}$ | 5,27 |

Fonte: *manual das fontes*

No contexto do trabalho, as fontes de maior interesse seriam o Co-60, por ter sido largamente utilizado em fontes de teleterapia, e o Am-241, utilizado em detectores de fumaça. Esses materiais, quando descartados de maneira incorreta ou em casos de negligência por parte do responsável, podem facilmente se transformar em fontes órfãs.

Fontes comerciais

Em um segundo momento, o sistema foi testado com fontes de calibração de Cs-137 e um irradiador industrial Sentinel 880 Sigma com fonte de irídio 192 na empresa Engisa, em Pinhais – PR. Os dados técnicos das fontes são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Características das fontes comerciais cedidas pela Engisa

| Material | Tipo | Número de série | Atividade (Ci) |
|----------|-----------------------|--|--------------------|
| Cs-137 | Fonte de aferição | 37641 | 0,25 |
| Ir-192 | Irradiador industrial | Irradiador S-2626 Fonte IRS – 89-02 | 16,7 11/06/2018 |

Fonte: *Engisa*

Os dois tipos de fonte foram escolhidos por apresentarem atividade de ordem de grandeza bem diferentes com o objetivo de avaliar a sensibilidade do equipamento.

As fontes comerciais representam uma grande preocupação dos órgãos de regulamentação e segurança pública por serem amplamente disponíveis no mercado (IAEA, 2011). Ainda, no caso das fontes de aferição, seu tamanho e preço reduzidos as tornam fortes candidatas ao extravio e furto, podendo passar despercebidas em diversas situações. Apesar de apresentarem baixa atividade, se violadas podem causar contaminação dos indivíduos e ambientes com que o material entrar em contato.

3.1.3 Instrumentos de medição

Osciloscópio

Um osciloscópio ICEL modelo OS-2202C (Figura 16) de uso particular foi utilizado para registrar a resposta em tensão no sistema devido à carga gerada pela formação de éxitons na zona de depleção do diodo.

Figura 16: Osciloscópio ICEL modelo OS-2202C.



Fonte: ICEL Série 2000 (2019)

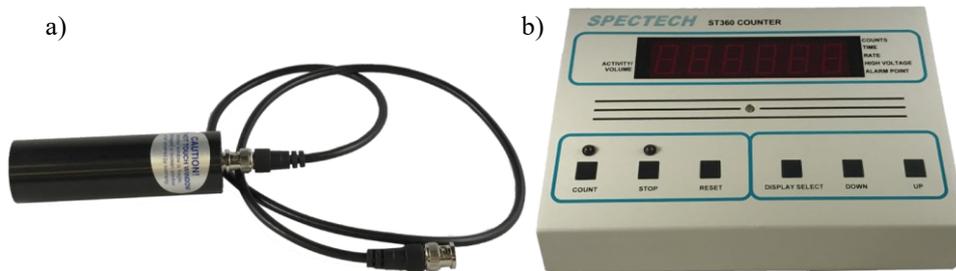
Geiger Müller

Antes do início dos experimentos, foi necessário verificar se as fontes estavam “quentes”, ou seja, efetivamente emitindo radiação. Para isso, foi utilizado o conjunto de medição Intermediate Nuclear System Lab, da Spectrum Techniques, cedido pelo LAPIM. Ele consiste em:

- Câmara Geiger Müller (GM) com janela de 35 mm, modelo GM35 (Figura 17)
- Suporte para o GM, modelo GMS35
- Contador ST360 (Figura 17)

A câmara era conectada ao contador através de um cabo BNC/BNC. A alimentação do contador ST360 pode ser ajustada de zero a 1200 V. Para a utilização com o GM, a tensão ótima de operação é de 800 V (SPECHTECH, 2002).

Figura 17: a) Geiger Müller com cabo BNC e b) Contador ST360



Fonte: Spectrum Techniques (2002)

Monitor RAD Keeper

A verificação de que as fontes didáticas estavam “quentes”, também foi realizada utilizando um monitor pessoal Rad Keeper (RDK), da Landa Sistemas (Figura 18) de uso particular.

O RDK é um detector de estado sólido que mede a dose absorvida em função do tempo, emitindo um alarme sonoro por minuto quando as taxas de dose excedem $10 \mu\text{Sv/h}$, 2 alarmes

por minuto acima de $20 \mu\text{Sv/h}$ e assim sucessivamente (RADKEEPER, 2019). O RDK é capaz de detectar raios X e raios gama numa faixa de energias que varia de 60 keV a 1,2 MeV (por exemplo, o Co^{60} emite radiação beta em 320 keV e gama com energias de 1,17 e 1,33 MeV).

Figura 18: Monitor pessoal Rad Keeper (a), monitor na presença de uma fonte de aferição



Fonte: RadKeep (2019)

3.1.4 Diodos

O sistema avaliado neste trabalho consiste em um circuito que utiliza como sensor um diodo PIN. As primeiras fases de experimento foram realizadas com o BPW34 e BPX 61. Já os diodos Osram SFH2240 e SFH 2430-Z e Vishay TEMD5510FX01 e VBPW34S foram adquiridos posteriormente, escolhidos por seu pico de sensibilidade e janela de absorção mais compatíveis com o uso como detectores de radiação gama do que o BPW34 e BP61.

Foram testados 6 diodos com janelas de absorção variadas, conforme a tabela 3.

Tabela 3- características dos diodos analisados

| Diodo | Área sensível (mm^2) | Espectro de sensibilidade (nm) | Pico de sensibilidade (nm) |
|--------------|---------------------------------|--------------------------------|----------------------------|
| BPW34 | 7,5 | 430-1100 | 900 |
| BPX61 | 7,00 | 400-1100 | 850 |
| SFH2240 | 7,02 | 400-690 | 620 |
| SFH 2430-Z | 7,02 | 400-900 | 570 |
| TEMD5510FX01 | 7,00 | 430-610 | 540 |
| VBPW34S | 7,5 | 430-1100 | 940 |

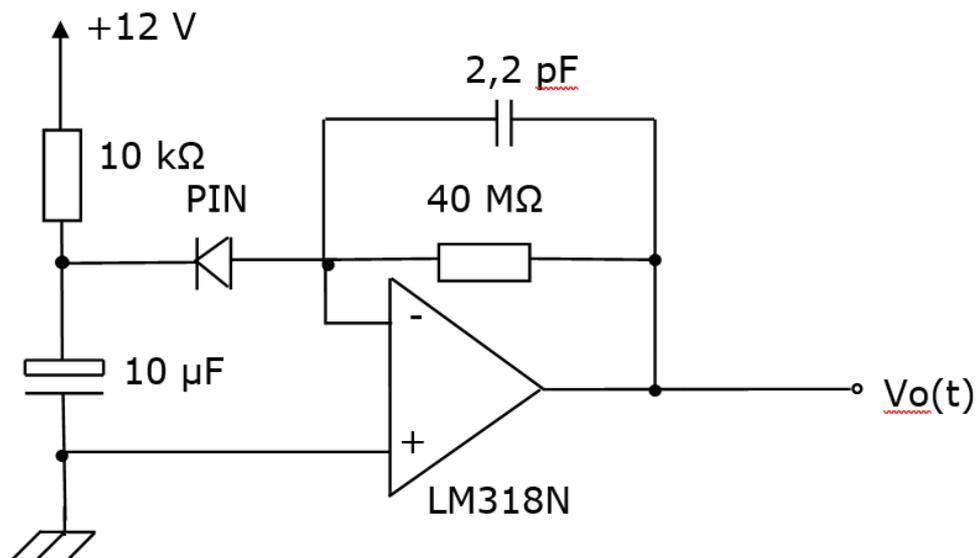
Fonte: Datasheets dos diodos

Para se ter uma ideia de custos, o diodo é a parte mais cara do sistema. O diodo mais caro entre os testados é o BPX61, que custa aproximadamente U\$12,00 quando comprado por unidade. Porém, este preço pode cair para próximo dos U\$8,00 quando comprado em lotes de 100 unidades (MOUSER ELECTRONICS, 2019).

3.1.5 Configurações do sistema

O circuito detector avaliado neste trabalho foi desenvolvido pelo professor Douglas Jakubiak, do Departamento Acadêmico de Eletrônica da UTFPR (DAELN), com o objetivo de detectar fótons decorrentes do decaimento radioativo de radionuclídeos. Várias combinações de amplificadores e capacitores foram testadas em busca da melhor relação sinal ruído (SNR). O diagrama da versão final, testada neste trabalho, é dado pela figura 19.

Figura 19: diagrama do circuito detector

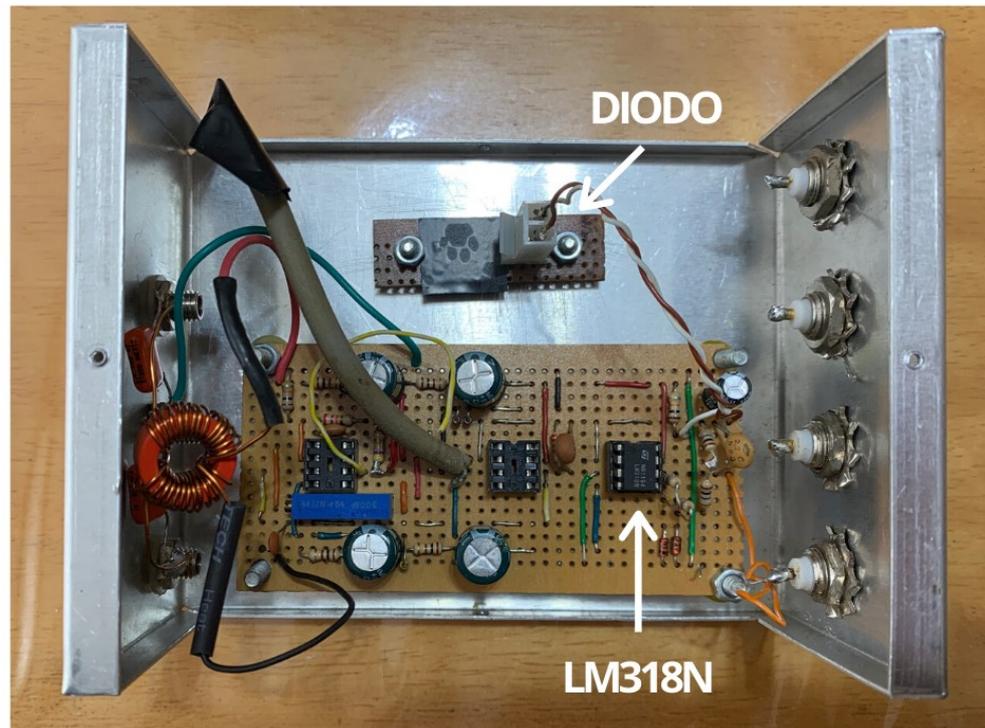


Fonte: O autor (2019)

O LM318N é um amplificador de transresistência que transforma a fotocorrente gerada pela interação dos fótons com a área sensível do diodo em um sinal de tensão. Ele é um amplificador operacional de alta velocidade, sendo adequado para aplicações em que uma alta *slew rate* (i.e, a velocidade de resposta de um amplificador a uma tensão de entrada) é necessária - como a do presente trabalho (TEXAS INSTRUMENTS, 2019). Ele foi escolhido após vários

testes com outros tipos de amplificador (ex: óticos) por ter apresentado o melhor ganho e a melhor estabilidade. A figura 20 mostra o circuito, destacando seus principais componentes:

Figura 20: circuito detector destacando o encaixe para o diodo e o amplificador de transresistência LM318N. os demais amplificadores estão desligados.



Fonte: o autor (2019)

Devido ao ponto de massa virtual, propriedade desse tipo de amplificador, a corrente que passa pelo diodo PIN é a mesma que passa no resistor de $40\text{ M}\Omega$. Como o diodo PIN é inversamente polarizado pela tensão de 12 V , o sinal da tensão de saída $V_o(t)$ é negativo e aparece no osciloscópio como um pico para baixo.

A desvantagem da utilização do LM318N como amplificador operacional é que, devido ao ruído térmico induzido pela alta resistência, o ruído do sistema é relativamente alto. Isso é um fator negativo já que, como já citado na sessão 2.4, a sensibilidade do silício diminui significativamente com o aumento da energia dos fótons incidentes.

O circuito foi blindado por uma proteção de alumínio para evitar interferência eletromagnética, como visto na figura 21.

Figura 21: circuito detector dentro da proteção de alumínio



Fonte: o autor (2019)

3.1.6 Outros materiais

Também foram utilizados:

- Fonte de tensão de 12 V de uso pessoal
- Folhas de chumbo de 1 mm de espessura para blindagem
- Fita isolante para blindar a entrada de luz
- OriginLab 2019 64bit para criação de gráficos

3.2 MÉTODOS

Antes de iniciar todos os experimentos, logo após a montagem do sistema, o diodo foi exposto à luz com o objetivo de confirmar que o sistema estava funcionando normalmente. Como são fotodetectores, cada vez que a fita usada para tapar a janela era retirada, um pico de tensão, ou seja, uma resposta à detecção de fótons, era mostrado no display do osciloscópio.

Durante todas as medidas, foi utilizado o dosímetro pessoal disponibilizado pelo DAFIS.

3.2.1 Medições com raios X Raytech

Os diodos BPW34 e BPX61 já haviam sido testados para detecção de raios X em trabalhos anteriores (SANGEETA *et al*, 2015) (KHAZHMURADOV, KOCHNEV, FEDORCHENKO, 2012) (OPENGEIGER, 2019) (KAINKA, 2001)(MAXIM, 2003)(OLIVEIRA, 2016). Desta maneira, os experimentos nessa faixa do espectro foram realizados com o objetivo de garantir, antes do início dos testes com radionuclídeos, que o sistema estava operando corretamente e era capaz de detectar fótons com alguns keV de energia. A montagem experimental é mostrada na figura 22:

Figura 22: a) montagem experimental utilizada durante as exposições no Laboratório de Radiações Ionizantes da UTFPR. b) fonte de tensão e saída do circuito com blindagem de chumbo.



Fonte: O autor (2018)

A fonte de tensão e o circuito (exceto a janela do sensor) foram protegidos por folhas de chumbo de 1 mm de espessura para evitar interferência eletromagnética da radiação com os circuitos internos dos equipamentos.

A janela do diodo foi posicionada a 1 m de distância da saída do tubo e exposta a feixes de raios X com diferentes energias (kV - define a energia máxima do feixe), diferentes correntes (mA) e tempos de disparo. Os valores foram escolhidos utilizando algumas combinações de

tempo e corrente disponíveis recomendadas no laboratório (utilizados em protocolos de radiodiagnóstico), produzindo o valor de produto corrente tempo (mAs) esperados. (Figura 23). A resposta do sensor à incidência de radiação ionizante foi mostrada pelo osciloscópio e as tensões geradas foram anotadas em forma de tabelas. Para cada medida, as telas do osciloscópio foram fotografadas para registro.

Figura 23: Tabela das combinações possíveis no equipamento Raytech.

| mA | 50 | 100 | 200 | 300 | 600 |
|-----------|-------|------|------|------|------|
| Tempo (s) | mAs | | | | |
| 0,008 | 0,4 | 0,8 | 1,6 | 2,4 | 4,8 |
| 0,016 | 0,80 | 1,6 | 3,2 | 4,8 | 9,6 |
| 0,025 | 1,25 | 2,5 | 5 | 7,5 | 15 |
| 0,033 | 1,65 | 3,3 | 6,6 | 9,9 | 19,8 |
| 0,05 | 2,50 | 5 | 10 | 15 | 30 |
| 0,066 | 3,30 | 6,6 | 13,2 | 19,8 | 39,6 |
| 0,1 | 5,00 | 10 | 20 | 30 | 60 |
| 0,125 | 6,25 | 12,5 | 25 | 37,5 | 75 |
| 0,15 | 7,50 | 15 | 30 | 45 | 90 |
| 0,2 | 10,00 | 20 | 40 | 60 | 120 |
| 0,26 | 13,00 | 26 | 52 | 78 | 156 |

Fonte: O autor (2018)

BPW34

Na primeira fase do procedimento experimental, as exposições foram realizadas com o intuito de determinar, qualitativamente, a sensibilidade por fluência de fótons do sistema, ou seja: verificar se haveria grande variação da resposta do sistema em função do aumento da corrente no tubo. A tensão escolhida foi de 44 kV, que é um valor bastante próximo ao limiar inferior para exames de extremidades radiodiagnóstico (40 kv). O diodo utilizado foi o BPW34, por ser o primeiro a ser adquirido e por ter sido utilizado em diversos trabalhos anteriores, como os citados na sessão de motivação. Todos os tempos disponíveis no equipamento e mostrados na figura 21 foram avaliados. Foram realizadas 3 medições para cada uma das correntes de 50, 100, 200 e 300 mA. A corrente de 600 mA não foi utilizada nesta fase, pois o sistema de proteção contra superaquecimento do tubo não permitiu, mostrando a mensagem de *overload*.

Na segunda fase, a corrente foi mantida constante em 200 mA e as tensões foram variadas entre 50, 70, 80 e 110 kV. A tensão de 120 kV, na maioria das exposições, não foi permitida pelo sistema de proteção contra superaquecimento do tubo de raios X.

Esse tipo de medição possibilita analisar a relação entre a energia dos fótons de raio X e da resposta do sensor. Os dados foram coletados para os tempos de 0,008 e 0,1 s, escolhidos por serem o menor tempo possível para esse equipamento e um comumente utilizado em radiodiagnóstico, respectivamente.

Outros diodos

Na terceira fase de experimentos, a resposta dos diodos Osram SFH2240 e SFH 2430-Z e Vishay TEMD5510FX01 e VBPW34S foi avaliada. Foi utilizado o mesmo padrão de medidas da segunda fase, onde a corrente e o tempo foram mantidos constantes (200 mA e 0,008 s, respectivamente) e as tensões foram variadas entre 50, 70, 80 e 110 kV. Também foi realizada uma medição com 44 kV para verificar a sensibilidade do sistema com cada um dos diodos.

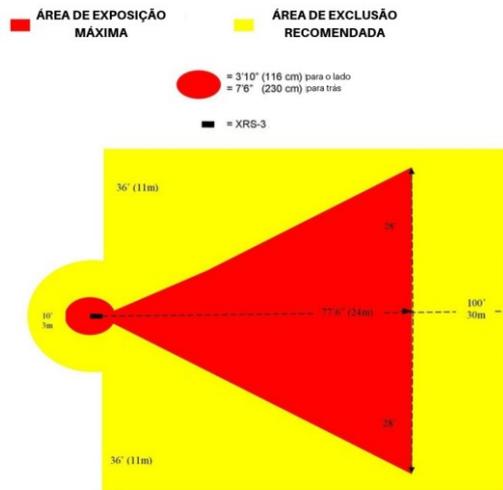
Ainda, o diodo TEMD5510FX01 foi testado com o tempo de 0,1 s para 200 mA e 300 mA, ambos sob 80 kV, por exibir um comportamento diferenciado dos demais.

3.2.2 XRS-3

O experimento com o XRS- 3 foi realizado em uma das salas de aula nas dependências do DAFIS da UTFPR, durante as instruções do III Curso de Técnico Explosivista Policial do Esquadrão Antibombas (EAB) da Polícia Militar do Paraná (PMPR). Esta etapa das medições foi realizada com viés qualitativo, visando confirmar se o sistema seria capaz de detectar pulsos rápidos.

Assim como no procedimento com o Raytech, o sensor foi posicionado a cerca de 1 m de distância do XRS-3. Foram disparados 5 pulsos por exposição, que é uma técnica de rotina em atendimentos de ocorrências. O sistema estava equipado com o diodo BPW34. Os procedimentos de segurança referentes à distância do equipamento (zona de exclusão) durante as exposições foram respeitados. A Figura 24 mostra as distâncias seguras de operação do XRS-3, que foram respeitadas durante o experimento.

Figura 24: Distâncias seguras de operação do XRS-3.



Fonte: manual do XRS-3 (2017)

3.2.3 Fontes didáticas

Atividade

Antes do início dos testes, cada uma das fontes didáticas foi avaliada utilizando um contador Geiger. O objetivo desta etapa foi meramente atestar que as fontes estavam “quentes”, ou seja, efetivamente emitindo radiação, sem necessidade de dados quantitativos. Mesmo assim, a contagem proveniente do *background* (BG) foi aferida e descontada dos valores medidos pelo Geiger. As frequências também foram calculadas com valores aproximados (arredondamento sem levar em conta valores decimais), afim de estimar a capacidade do circuito de detectá-las, assim como a faixa ideal de ajuste do osciloscópio para identificar os picos resultantes da detecção.

A verificação de que as fontes estavam efetivamente emitindo radiação ionizante também foi realizada utilizando o RDK. Tentou-se realizar a mesma estimativa também com canetas dosímetro do LAPIM. Contudo, após desconfiar da ausência de leitura, verificou-se que as mesmas estavam descalibradas.

Após a confirmação de que havia emissão nos quatro radionuclídeos disponíveis (Am-241, Na-22, Sr-90 e Co-60), três etapas de exposições foram realizadas.

BPW34 e BPX 61

Os primeiros experimentos do projeto com radionuclídeos consistiram na exposição dos diodos BPW34 e BPX61 às fontes didáticas de Am-241, Na-22, Sr-90 e Co-60.

Por serem seladas e apresentarem baixa atividade, a janela da blindagem de cada fonte foi posicionada diretamente acima da janela do diodo. Num primeiro momento, isso foi realizado com a proteção contra a luz e, num segundo momento, sem, pois a blindagem das fontes tem diâmetro suficiente para isolar a abertura do contato com a luz ambiente. Durante esse processo, o sinal mostrado pelo osciloscópio foi observado em busca de variações.

Outros diodos

Após a aquisição dos diodos Osram SFH2240 e SFH 2430-Z e Vishay TEMD5510FX01 e VBPW34S, o experimento acima foi repedido para cada diodo e cada fonte.

3.2.4 Fontes comerciais

Os experimentos com as fontes comerciais foram realizados na empresa Engisa, em Pinhais – PR, com o auxílio de um profissional da empresa. Durante todo o procedimento, foram portados o dosímetro pessoal e o monitor RDK.

O sistema foi equipado com o diodo BPW34 pois, nesta fase, os diodos Osram SFH2240 e SFH 2430-Z e Vishay TEMD5510FX01 e VBPW34S ainda não haviam sido adquiridos.

Fontes de aferição

As fontes de aferição foram utilizadas para analisar se o sistema era capaz de detectar emissões de radionuclídeos de baixa atividade, mas de alta disponibilidade no mercado. Para o teste, as fontes foram simplesmente posicionadas sobre a janela do diodo BPW34

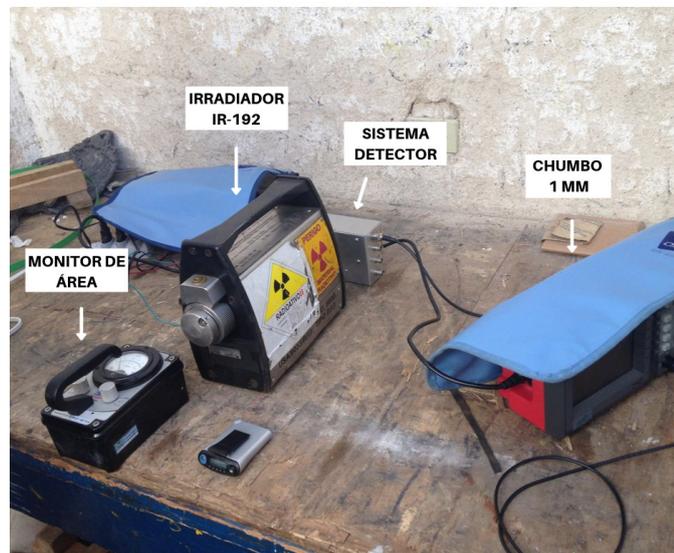
Irradiador industrial

As exposições com o irradiador Sentinel 880 Sigma foram realizadas no *bunker* apropriado da empresa Engisa, em Pinhais – PR, com o auxílio de um profissional da empresa. A montagem experimental pode ser vista na figura 25.

A janela do diodo foi posicionada a cerca de 20 cm da janela do irradiador (Figura 25). O experimento da seguinte forma: o operador abriu a janela cerca de 45° de cada vez, até a chegar na abertura máxima permitida pelo equipamento. Após cada modificação no tamanho da janela, houve uma pausa para que o sinal mostrado pelo osciloscópio fosse monitorado por cerca de 1 minuto. Como a fonte apresentava atividade alta, essa janela de tempo deveria ser suficiente para mostrar a resposta do sensor caso ela ocorresse.

Durante todo o experimento, além do dosímetro pessoal e do RDK, foi utilizado um monitor de área. O osciloscópio e a fonte foram protegidos por chumbo 1 mm.

Figura 25: Montagem experimental das medições na Engisa



Fonte: O autor (2018)

CAPITULO 4

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

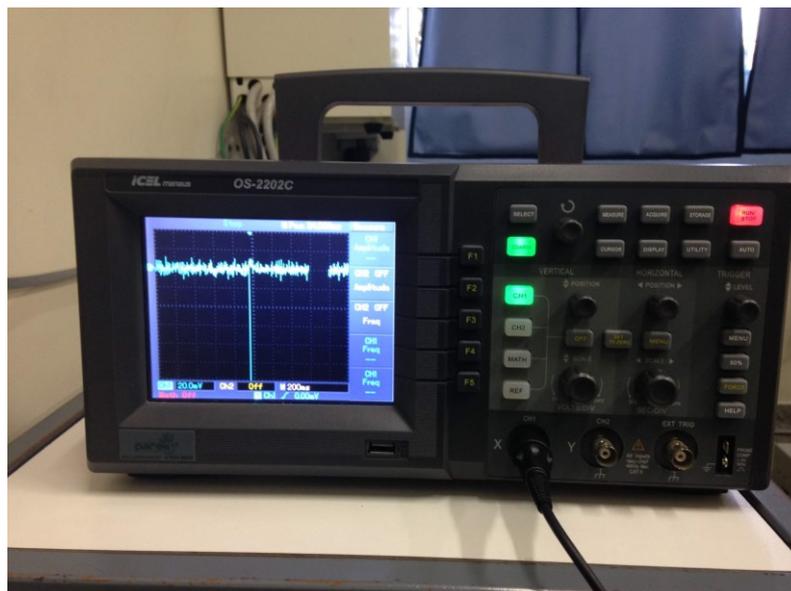
Este capítulo traz os resultados dos experimentos realizados com os raios X e com os radionuclídeos, assim como a discussão dos dados obtidos.

4.1 TESTES DE EXPOSIÇÃO DO SENSOR À DIFERENTES FONTES DE RADIAÇÃO IONIZANTE

4.1.1 Raios X

O sistema respondeu a 100% das exposições a feixes de raios X, com todos os diodos testados. Quando um disparo era realizado, o osciloscópio exibia picos, como mostrado na figura 26.

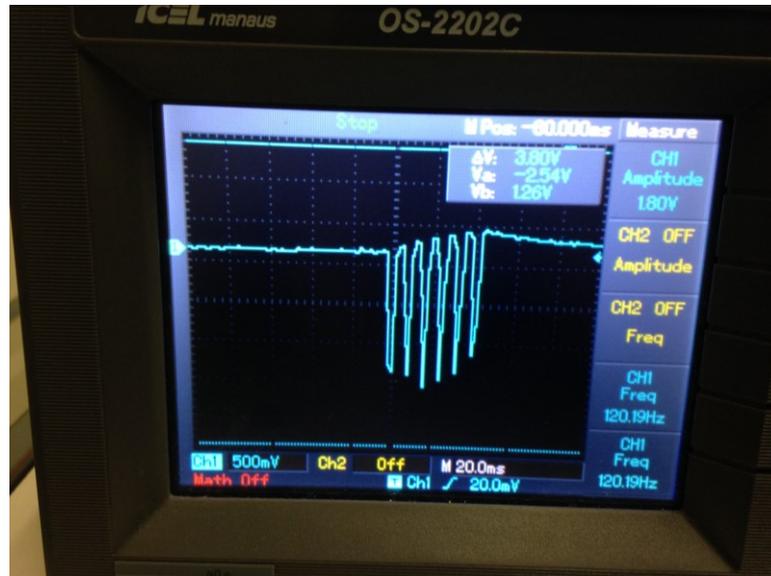
Figura 26: O sinal mostrado pela tela do osciloscópio mostra que o detector estava funcionando de maneira adequada quando exposto a raios X.



Fonte: O autor (2018)

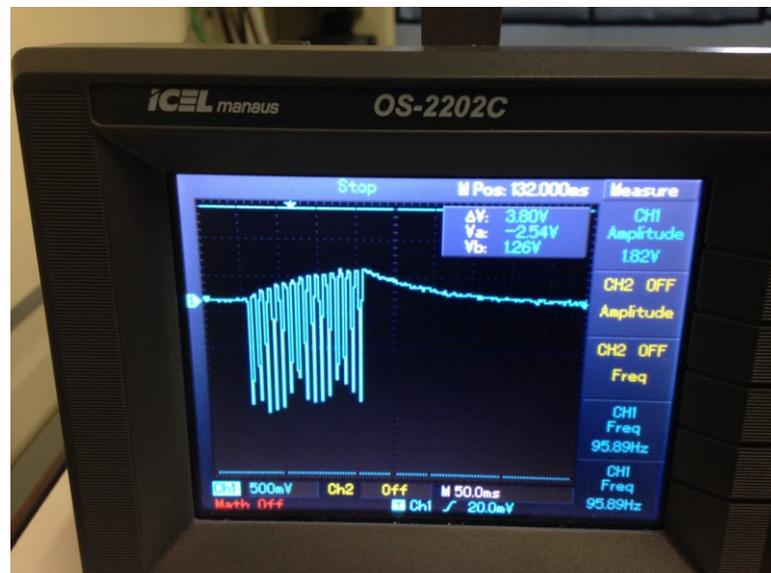
O número de picos exibidos pelo osciloscópio aumentava quando a corrente era aumentada (Figuras 27 e 28).

Figura 27: Picos mostrados pelo osciloscópio para 200 mA e $t = 0,125$ s.



Fonte: O autor (2018)

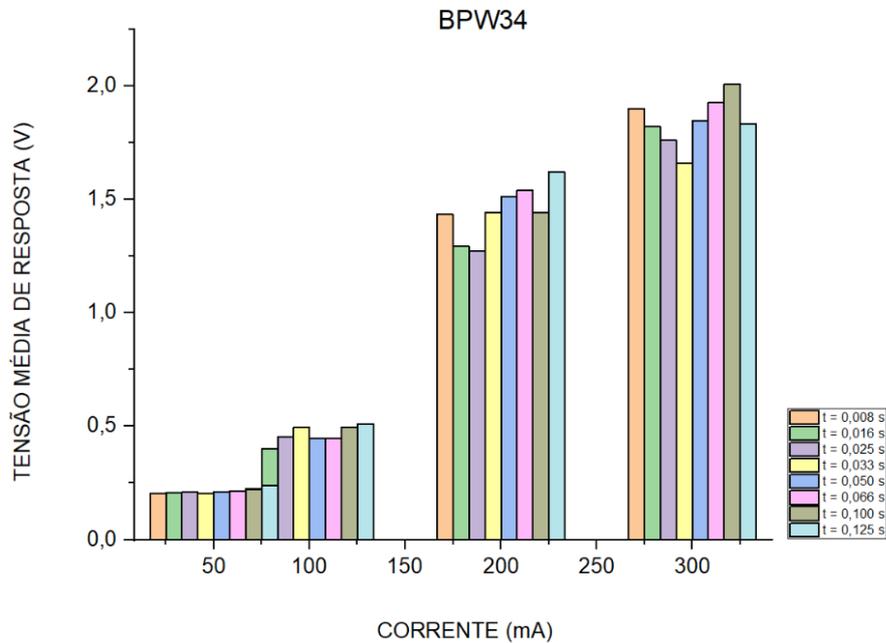
Figura 28: Picos mostrados pelo osciloscópio para 300 mA e $t = 0,125$ s.



Fonte: O autor (2018)

A figura 29 mostra um gráfico das tensões de resposta exibidas pelo osciloscópio quando o diodo BPW34 foi exposto a feixes de raios X de energia fixa de 44 kV com diferentes tempos e correntes.

Figura 29: Resposta do diodo BPW34 em função do tempo (s) e de diferentes correntes (mA) para 44 kV.



Fonte: O autor (2018)

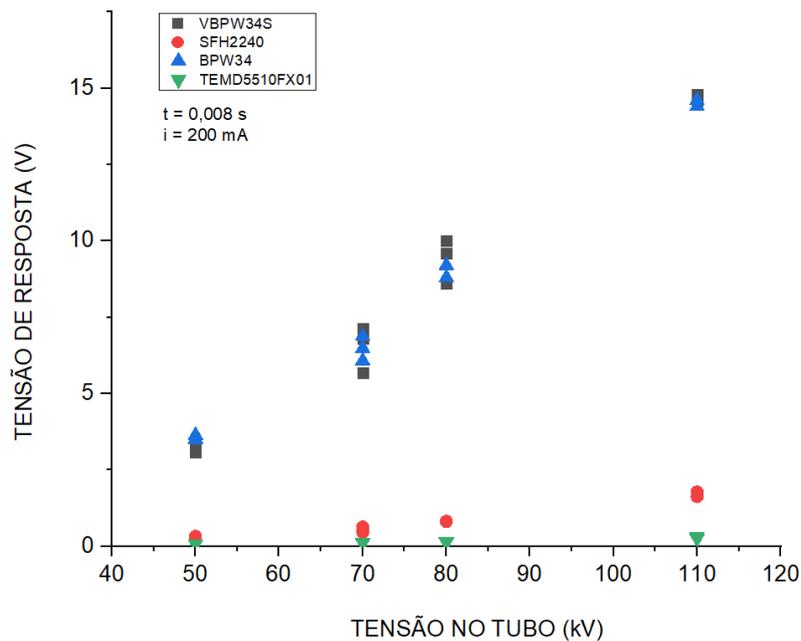
Nota-se que a magnitude da corrente aplicada influencia diretamente na resposta do sensor. Ao aumentar a corrente, aumenta-se o número de elétrons acelerados no tubo de raios X e, conseqüentemente, o número de fótons que atinge a janela do diodo num mesmo instante de tempo. Contudo, fica claro que o tempo de exposição, mesmo comparando grandes variações, tem menor influência na intensidade da tensão de resposta exibida pelo osciloscópio quando comparada com a variação induzida pela mudança na corrente. Observando os dados é possível, inclusive, observar uma linha de tendência linear da mudança da tensão de resposta em função do aumento da corrente no tubo de raios X.

O gráfico exibido na figura 30 mostra um gráfico da resposta de quatro diodos diferentes quando expostos a feixes de raios X com correntes de 200 mA por 0,008 s, com tensão variável de 50 a 110 kV, ou seja: variando a energia dos fótons de raio X.

A resposta dos diodos à variação de tensão no tubo é linear, com coeficiente de correlação calculado pelo Origin maior do que 0,97 para todos os casos. Um dado interessante fornecido pelo gráfico da figura 30 é a visível a semelhança na resposta entregue por diodos de

mesmos fabricantes. Além da magnitude da tensão de resposta, os coeficientes angulares das curvas para os diodos fabricados pela Vishay e os fabricados pela Osram são semelhantes entre si.

Figura 30: Resposta de diferentes diodos BPW34 para feixes de raios X com diferentes tensões. As características das curvas mostram a semelhança na resposta entre os diodos de mesmos fabricantes.



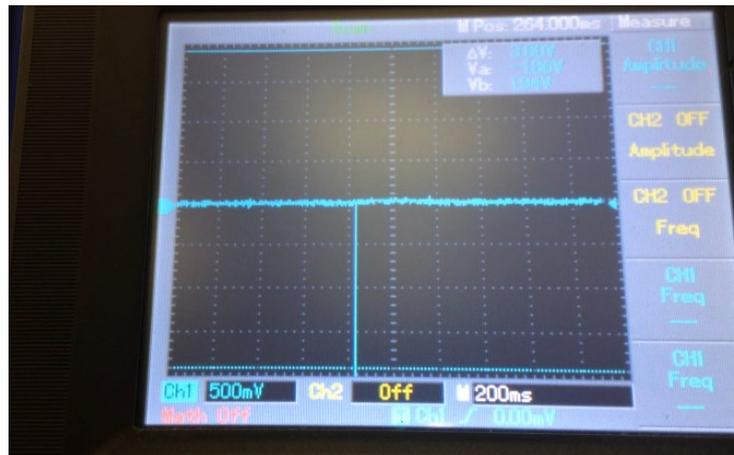
Fonte: O autor (2018)

XRS-3

Durante o experimento com o XRS-3, foi possível observar alguns picos de detecção quando o equipamento foi disparado (Figura 31). Contudo, a detecção ocorreu de maneira menos precisa do que nas medições com o equipamento de uso radiodiagnóstico. Em todas as exposições foi possível observar picos de tensão, mas o número de picos não foi constante entre uma exposição e outra.

Isso não foi visto como problema, pois essas medições tiveram caráter meramente qualitativo, mas confirma a capacidade do sistema em detectar pulsos rápidos. Esse é um resultado importante para validar o LM318N como um amplificador de resposta rápida, como o procurado no momento em que o sistema estava sendo desenvolvido.

Figura 31: Detecção durante o disparo como XRS-3 do Esquadrão Antibombas da PMPR.



Fonte: O autor (2018)

4.1.2 Fontes didáticas

Os resultados das aferições das contagens emitidas por cada fonte didática são apresentados na tabela 4:

Tabela 4- Contagens aferidas pelo contador ST360

| Fonte | Contagens t = 5 min | Contagens t = 1 min | Frequência aproximada (Hz) |
|--------|------------------------|------------------------|-------------------------------|
| Am-241 | 2966 | 593 | 10 |
| Na-22 | 49066 | 9813 | 164 |
| Sr-90 | 247810 | 49562 | 800 |
| Co-60 | 7205 | 1441 | 24 |

O valor da contagem oriunda da radiação de fundo foi de aproximadamente 60 contagens por minuto.

BPW34 e BPX61

Não foi possível caracterizar detecção durante exposições aos radionuclídeos com os diodos BPW34 e BPX61, mesmo com diversas configurações do circuito visando melhorar a

razão sinal ruído (SNR). Foram realizadas cerca de 7 sessões de medições nesta configuração, variando fatores como distância, aterramento e blindagem, sem sucesso.

Esse resultado realmente era esperado para as fontes de Sr-90 pois, apesar de apresentar a atividade mais alta dentre todos os radionuclídeos analisados nesta fase, ele é um beta emissor. Nesse caso, com as proteções como a fita e a proteção plástica dos diodos, apenas as partículas beta mais energéticas seriam capazes de atravessar. A falta de detecção nas medições com Na-22 também pode ser atribuída à energia dos fótons gama do mesmo, que é maior do que 2 MeV.

Já o Am-241 e o Co-60 apresentam, em teoria, emissões em faixas de energia mais adequadas para detecção com silício. Assim, com o resultado negativo dos experimentos, a conclusão inicial foi a de que a atividade dessas fontes era baixa demais para gerar um número suficiente de portadores minoritários para que a corrente coletada gerasse um pulso maior do que o ruído do sistema. Isso não foi interpretado, primeiramente, como um fator limitador, já que o objetivo inicial do circuito analisado seria identificar fontes que pudessem oferecer risco imediato à saúde de indivíduos expostos – o que não é o caso das fontes didáticas aqui avaliadas.

Alguns pulsos eram mostrados pelo osciloscópio, mas não foi possível vinculá-los à atividade das fontes devido à sua natureza aleatória. Em alguns momentos, eram mostrados 2 pulsos seguidos, enquanto, em outros, passava-se mais de 1 minuto sem nenhum sinal que pudesse se distinguir do ruído. Com isso, concluiu-se a maior probabilidade é a de que tais detecções sejam provenientes da radiação de BG, como raios cósmicos, e não das fontes em si.

Além disso, as atividades fornecidas pelo manual das fontes (74 kBq) diz respeito à época em que foram manufaturadas – no caso, em 2012. Desta maneira, as fontes de sódio (meia vida de 2,36 anos) e cobalto (meia vida de 5,27 anos) sofreram redução em suas atividades entre o momento de produção e o momento dos experimentos. Em janeiro de 2018, quando os experimentos preliminares foram realizados, a atividade do sódio já havia se reduzido a um quarto, enquanto a do cobalto, à metade.

Outros diodos

Após o recebimento dos diodos Osram SFH2240 e SFH 2430-Z e Vishay TEMD5510FX01 e VBPW34S, os mesmos testes aplicados aos diodos BPW34 e BPX61 foram realizados. Novamente, não foi possível caracterizar detecção.

Em determinada medida com a fonte de Na-22, uma série de picos com intervalo de tempo pequeno apareceu acima da linha do ruído do sistema. Contudo, após desconfiança de que seria apenas interferência eletromagnética, desligou-se o ventilador do laboratório. Como

esperado, os picos desapareceram, provando serem fruto de instabilidades geradas pelo funcionamento do eletrodoméstico. Em todas as outras situações, o sistema, independente do diodo acoplado, comportou-se da mesma maneira do que nos testes com o BPW34 e o BPX61, ou seja: com pulsos mostrados pelo osciloscópio, mas que não puderam ser vinculados à atividade das fontes devido à sua natureza aleatória. Provavelmente oriundos de BG ou de raios X característicos provenientes das desintegrações.

4.1.3 Fontes comerciais

Assim como nos experimentos com as fontes didáticas, não foi possível caracterizar detecção nem com as fontes de aferição de Cs-137 ou com o irradiador industrial de Ir-192, independente da distância das fontes ou do ângulo de abertura da janela do irradiador.

Numa primeira análise, a ausência de resposta do sistema quando exposto a fontes foi atribuída ao número de partículas que atingem o detector. Analisando o sinal mostrado pelo osciloscópio, nota-se que o ruído de fundo é em torno de 10 mV. Com a resistência do amplificador utilizado no estado atual do sistema é de 40 M Ω , pode-se calcular, pelo ganho, que a corrente necessária para gerar um pico que possa ser considerado um sinal separado do ruído é de aproximadamente 250 pA. Se levarmos em conta que, para ser considerado um sensor válido, a amplitude da tensão deve ser em torno de 4 vezes esse valor, a corrente necessária se eleva para cerca de 1 nA.

Considerando que a atividade das fontes didáticas e das fontes de calibração é baixa, o fator preponderante na ausência de sinal pode ser que o número de fótons que chega até a janela do diodo é inferior ao necessário para gerar um sinal maior do que o ruído. Ou seja: o sensor não teria sensibilidade o suficiente para detectar fontes com atividades tão baixas.

Essa hipótese, contudo, não explica de forma satisfatória a ausência de detecção quando o sistema foi exposto à fonte industrial de Ir-192. Com uma atividade de quase 17 Ci na data das medições, um indivíduo que sofra uma exposição de corpo inteiro a essa fonte desenvolveria, dentro de pouco tempo, os primeiros sinais da Síndrome Aguda das Radiações (SAR). Ou seja: um sistema incapaz de detectar tal fonte não é útil para o uso como rastreador de fontes órfãs pois, além de tudo, colocaria em risco a saúde do operador.

Ainda, no trabalho desenvolvido por (OLIVEIRA, KHOURY, SANTOS, 2016), os pesquisadores expuseram o mesmo diodo BPW34 a fontes padrão de Co-60 e Cs-137 de um irradiador OB-85. Os resultados mostram que as correntes estimadas obtidas nessas exposições foram de 7,76 e 15,87 pA, respectivamente. Esses são valores de corrente muito baixos. Apesar

de ser um sistema diferente, as correntes geradas pela exposição do mesmo diodo são menores do que o limite de detectabilidade do sistema desenvolvido neste trabalho.

Assim como no irradiador de Ir-192 utilizado neste trabalho, a atividade das fontes no OB-35 é alta (1 Ci para Co-60 e 20-Ci para o Cs317 (NAZÁRIO, 2003). Ou seja: mesmo fontes com altas atividades geraram correntes muito baixas. Nesse contexto, a conclusão foi de que fontes de menores intensidades não poderão ser detectadas, pois o número de fótons ionizantes que atinge a região de junção do diodo é inferior ao necessário para gerar um número de portadores minoritários suficiente para gerar uma corrente de pelo menos 1 nA.

Diante desta situação, fica claro que o sistema estudado é um bom detector de raios X, mas é incapaz de detectar radiação gama. Assim, o foco do trabalho convergiu para compreender o motivo de tal comportamento.

Algumas soluções foram pensadas para o problema, como melhorias em características do sistema que possam ser avaliadas para que a detectabilidade seja melhorada. Sabe-se, por exemplo, que a temperatura, diretamente responsável pela injeção de ruído térmico e efeito Schottky, influencia na detecção de fótons gama por semicondutores. Temperaturas altas fazem com que elétrons sejam promovidos espontaneamente da banda de valência para a banda de condução (KNOLL, 2001), gerando ruído. Logo, temperaturas mais baixas poderiam melhorar a sensibilidade do sistema. Outra solução cogitada foi a de interligar diodos em arranjo para aumentar a resolução espacial do sistema, com o objetivo de coletar mais fótons. No entanto, após extensa busca na literatura, combinado com conceitos de física das radiações com os de física do estado sólido, concluiu-se que o problema reside na própria natureza do silício, como abordado a seguir.

4.2 SILÍCIO COMO DETECTOR

Como citado na sessão de Motivação (1.1), uma das grandes motivações da realização deste projeto foi a que há alguns trabalhos citando diodos PIN baseados em silício como uma “solução rápida e barata” para um detector de radiação gama. Porém, ao realizar uma pesquisa aprofundada em livros e artigos acadêmicos encontra-se, de maneira quase unânime, que semicondutores baseados em Si são úteis na detecção de raios X, mas não desempenham bem na detecção de raios gama. A compreensão desse problema, porém, não é óbvia, pois pouco se encontra sobre quais são as características do silício que levam à baixa capacidade de detecção nessa faixa energética. Essa sessão traz uma discussão das possíveis causas desse comportamento.

4.2.1 Características físicas

Gap de energia

Um dos aspectos abordados pela literatura é que um dos fatores necessários para detecção de fótons gama seria um gap maior, pois isso “filtraria” sinais indesejados que contribuiriam para o ruído. No entanto, essa parece uma análise simplista, já que a diferença da energia do gap dos materiais e dos fótons incidentes é muito grande. Isso realmente contribuiria na seleção dos elétrons com energia adequada para o sinal desejado, mas não explica por que o silício não é capaz de detectar fótons gama com energias muito mais altas do que o gap.

Número atômico

Outro aspecto que chamou a atenção é que, diferentemente do silício, o germânio e o CaTe são bastante utilizados em espectroscopia de raios gama. Só em 2019, o Google Acadêmico tem de 3 mil resultados para detectores de raios gama de germânio (GOOGLE SCHOLAR) (Figura 32). Uma das principais diferenças entre os materiais é o número atômico Z : $Z_{Si}=14$, $Z_{Ge}=32$ e o equivalente do CdTe=100. Nesse contexto, a seção de choque do silício é menor do que a do germânio e do CdTe, ou seja: a probabilidade de um fóton interagir com a matriz cristalina no silício é bem menor do que com os outros dois materiais.

Figura 32: Resultados para a busca para “germanium gamma ray detectors” publicados em 2019 no Google Acadêmico.

Google Acadêmico

germanium gamma ray detectors

Artigos

Aproximadamente 3.090 resultados (0,12 s)

A qualquer momento
Desde 2019
Desde 2018
Desde 2015
Período específico...

Classificar por relevância
Classificar por data

Em qualquer idioma
Pesquisar páginas em Português

Incluir patentes
 Incluir citações

Criar alerta

Towards megapixel-class **germanium** charge-coupled devices for broadband **x-ray detectors**
CW Leitz, M Zhu, S Rabe, B Burke... - ... X-Ray, and Gamma ..., 2019 - spiedigitallibrary.org
A **germanium** charge-coupled device (CCD) offers the advantages of a silicon CCD for X-ray detection—excellent uniformity, low read noise, high energy resolution, and noiseless on-chip charge summation—while covering an even broader spectral range. Notably, a ...

Performances of different efficiency calibration methods of high-purity-**germanium gamma-ray** spectrometry in an inter-comparison exercise
BL Yang, Q Zhou, J Zhang, SM Yao, ZS Li... - Nuclear Science and ..., 2019 - Springer
... One of them was a broad-energy coaxial high-purity-**germanium** (HPGe) detector (BE5030, Canberra, USA) with a crystal length ... **γ-ray** energy (keV) ... Although the performances of LabSOCs and ANGLE for 241 Am emitting low-energy **gamma rays** were not very satisfactory, they ...

Fabrication and characterization of high-purity **germanium detectors** with amorphous **germanium** contacts
XH Meng, GJ Wang, MD Wagner, H Mei... - Journal of ..., 2019 - iopscience.iop.org
... produced isotopes can limit the sensitivity for large-scale **germanium**-based (Ge... a standard technology to achieve spectroscopy or imaging of **gamma rays** by providing ... best compromise between energy resolution and efficiency for high resolution **gamma-ray** spectroscopy [14]

Fonte: Google Acadêmico

Nas configurações dos experimentos, os fótons gama interagem, principalmente, por efeito fotoelétrico e efeito Compton. A dependência da probabilidade de ocorrência do efeito fotoelétrico, que seria o melhor mecanismo para detecção num semiconductor, pois o fóton desaparece completamente sem deixar outras partículas espalhadas, é em Z^4 e, para algumas energias, até Z^5 . Já para efeito Compton é proporcional a Z . Logo, em ambos os casos, quanto maior o Z , maior a probabilidade de um fóton que incide na estrutura cristalina interagir, liberando elétrons.

Estrutura de bandas

Ainda, é possível que a própria estrutura de bandas do silício apresente características em que as primeiras transições para elétrons e buracos gerados pela interação dos fótons na faixa energética utilizada nos experimentos sejam proibidas. Isso faria com que, independente do arranjo experimental e de como a SNR seja melhorada, o silício seja “transparente” para esses fótons.

Transporte de carga

A explicação mais provável para o não funcionamento dos diodos PIN baseados em silício na detecção de raios gama está na energia depositada pelos fótons no semiconductor. A dúvida principal que rege a discussão deste trabalho é porque que as medições com raios X apresentam resultados claros, enquanto as medições com radionuclídeos não apresentam detecção.

A principal diferença entre os raios X e os radionuclídeos estudados é a energia dos fótons. Nas medições com os aparelhos de raios X, a energia máxima dos fótons utilizada foi de 110 keV. Enquanto isso, os radionuclídeos estudados, por estarem ligados por força nuclear forte, emitem fótons com energias da ordem de até alguns MeV. Dessa maneira, é importante compreender como essa diferença de energia afeta o transporte de carga no diodo.

Zona de depleção

Na zona de depleção, as cargas são transportadas mais rapidamente do que são geradas. Contudo, é necessário ser capaz de coletar os portadores rápido o suficiente para que não ocorra um efeito significativo de recombinação antes que a carga possa ser coletada. Para isso, devem

ser aplicadas tensões altas na área da junção, normalmente variando de 500-3000 V (KNOLL, 2001).

A recombinação e o aprisionamento de carga são fatores agravantes no silício já que, devido seu alto ponto de fusão, é mais difícil conseguir altos graus de pureza do que em materiais como o germânio (KNOLL, 2001). Quanto maior a porcentagem de impurezas na estrutura do material, maior a densidade de armadilhas e zonas de recombinação e, conseqüentemente, menor a mobilidade de carga. A recombinação Auger, por exemplo, foi citada como fator significativo na solução do “enigma” da queda do rendimento de células solares baseadas em silício (VAQUEIRO-CONTRERAS M. et al, 2019). Dessa maneira, é possível que os dispositivos em questão não sejam capazes de coletar os portadores gerados pela interação dos fótons gama com o silício rápido o suficiente antes que recombinem.

Em resumo, pode-se concluir que o silício tem características que contribuem para que ele seja pouco eficiente na detecção de radiação gama de energias na faixa de MeV, destacando-se: baixo número atômico, dificultando a interação de partículas não carregadas e de altas energias, e alto ponto de fusão, diminuindo a pureza do material e aumentando o número de zonas de recombinação. Assim, quando expostos à radiação gama, além de poucos fótons interagirem com a superfície do sensor, as cargas geradas pela interação com o meio não são coletadas rápido o suficiente para gerarem um sinal distinguível do ruído do sistema.

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSÃO

Os resultados apresentados neste trabalho demonstram que os diodos PIN avaliados são eficazes na detecção de fótons de raios X. Foi possível detectar a corrente gerada pela interação dos fótons em diversas configurações de corrente e energias, bem como obter relações entre os parâmetros avaliados. Esses resultados mostram que o sistema funciona adequadamente. Foi possível visualizar, inclusive, que o perfil de resposta dos diodos de cada marca (Osram e Vishay) segue um padrão semelhante.

Já as exposições às fontes de radionuclídeos de diferentes atividades, em diferentes faixas energéticas, demonstraram que o sistema não é capaz de detectar radiação gama na faixa de alguns MeV. Mesmo testando diferentes configurações e diferentes diodos, não foi possível caracterizar a detecção.

Inicialmente, acreditou-se que o problema seria a baixa atividade das fontes utilizadas nas medições. Contudo, após medições com a fonte de Ir-192 e análise da literatura sobre mecanismos de transporte de carga, a ausência de detecção foi atribuída, principalmente, à energia dos fótons gama e sua relação com as características intrínsecas do silício. O baixo número atômico do material faz com que a probabilidade de interação dos fótons com a região de depleção do diodo PIN seja baixa. Já o alto ponto de fusão faz com que seja mais difícil retirar as impurezas do que no germânio, por exemplo. Isso facilita a criação de armadilhas e zonas de recombinação na estrutura do semicondutor. Consequentemente, quando há interação, o volume de carga injetado é tão alto que o transporte dos portadores minoritários não ocorre antes que haja aprisionamento e recombinação.

Finalmente, conclui-se que o sistema avaliado, independente do diodo utilizado durante os testes, não pode ser utilizado como um detector auxiliar na segurança pública para a detecção de fontes órfãs por não apresentar sensibilidade adequada.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se, em continuidade aos resultados deste trabalho, estudar de maneira mais aprofundada os mecanismos que levam o silício a não ser capaz de detectar radiação gama de forma satisfatória. Ainda, realizar medições com temperaturas mais baixas afim de diminuir o ruído térmico, assim como é realizado na espectroscopia gama com germânio.

Sugere-se, também, que o sistema seja testado com diodos utilizando outros materiais na área sensível.

REFERÊNCIAS

APS - American Physical Society, American Association for the Advancement of Science. **Nuclear Forensics Role, State of the Art, Program Needs**, 2008.

BARATA, B.M.; **30 Anos do acidente de Goiânia**, Brasil Nuclear, edição 47, p. 16-19, 2017

CNEN- Comissão Nacional de Energia Nuclear; **Relatório do acidente radiológico em Goiânia**, 1988. Disponível em: <https://www.ipen.br/biblioteca/outros/18866.pdf> >. Acessado em: 22 Ago 2019

CNEN- Comissão Nacional de Energia Nuclear, **Segurança Física**. Disponível em: <<http://www.cnen.gov.br/seguranca-fisica-nuclear>>. Acessado em: 22 Ago 2019

CNS- James Martin Center for Nonproliferation Studies; **CNS Global Incidents and Trafficking Database**. Disponível em: <<https://www.nti.org/analysis/articles/cns-global-incidents-and-trafficking-database>>. Acessado em: 22 Ago 2019

COOPER, H.; SANGER, D.E.; **Obama Seizes on Missile Launch in Seeking Nuclear Cuts**, The New York Times, 2009. Disponível em <<https://www.nytimes.com/2009/04/06/us/politics/06prexy.html>>. Acessado em: 15 Out 2019

ECKERT&ZIEGLER,; **Demonstration Sources**. Disponível em: <https://www.ezag.com/home/products/isotope_products/isotrak_calibration_sources/education_training>. Acessado em: 28 Abr 2019

GOIÁS24HORAS; **“Jogaram pedra, pedaço de meio-fio, de cruz, tudo que encontravam”, lembra mãe de menina que teve caixão apedrejado por José Nelto**. Disponível em: <<https://goias24horas.com.br/62833-jogaram-pedra-pedaco-de-meio-fio-de-cruz-tudo-que-encontravam-lembra-mae-de-menina-que-teve-caixao-apedrejado-por-jose-nelto>>. Acessado em 05 Out 2019

GOLDEN ENGINEERING; **XRS-3 X-ray source operator's manual**. Disponível em: <http://www.goldenengineering.com/wp-content/uploads/2018/01/XRS3_14vOperators-Manual-May-2017-V2.pdf>, 2017 Acessado em: 28 Abr 2019

GOOGLE SCHOLAR; **Germanium gamma ray detectors**. Disponível em: <https://scholar.google.com/scholar?as_ylo=2019&q=germanium+gamma+ray+detectors&hl=pt-BR&as_sdt=0,5>. Acessado em 15 Out 2019

GRIFFITHS, D.J.; **Introduction to Electrodynamics**, Reed College, 4e, 2012

HOLDREN, J.P., In: National Academy Of Sciences, **Science and Technology to Counter Terrorism: Proceedings of an Indo-U.S. Workshop**. Washington, DC, p. 61-69, 2007.

IAEA, International Atomic Energy Agency. **IAEA 2005 BORDEAUX - International Conference on the Safety and Security of Radioactive Sources: Towards a Global System for the Continuous Control of Sources throughout Their Life Cycle (2005 : Bordeaux, France)**, Viena, 2005.

IAEA, International Atomic Energy Agency, **International Conference on the Security of Radioactive Material: The Way Forward for Prevention and Detection**, Viena, Austria, 2018. Disponível em <<https://www.iaea.org/newscenter/news/iaea-meeting-on-radiation-detection-instruments-highlights-role-of-science-technology-and-engineering-in-nuclear-security>>, Acesso em: 28 abril 2019 a

IAEA - International Atomic Energy Agency. **IAEA Incident And Trafficking Database (ITDB): Incidents of nuclear and other radioactive material out of regulatory control Data Sheet**, 2015.

IAEA - International Atomic Energy Agency - **IAEA Incident And Trafficking Database (ITDB): Incidents of nuclear and other radioactive material out of regulatory control**, 2019

IAEA - International Atomic Energy Agency, **IAEA meeting on radiation detection instruments highlights role of science, technology and engineering in nuclear security**,

Viena, Austria, 2018. Disponível em <<https://www.iaea.org/newscenter/news/iaea-meeting-on-radiation-detection-instruments-highlights-role-of-science-technology-and-engineering-in-nuclear-security>>, Acesso em: 28 abril.2019 b

IAEA - International Atomic Energy Agency, **National strategy for regaining control over orphan sources and improving control over vulnerable sources: specific safety guide.** International Atomic Energy Agency, Viena, 2011

IAEA - International Atomic Energy Agency. **IAEA Nuclear Security Series No. 2 Technical Guidance - Nuclear Forensics Support Reference Manual**, 2006.

IAEA - International Atomic Energy Agency. **Radiation, people and the environment**, Viena, 2004

IAEA - International Atomic Energy Agency. **The IAEA Safety Glossary - Terminology Used in Nuclear Safety and Radiation Protection**, Viena, 2018 c

JACKSON J.D.; **Classical Electrodynamics**, Willey&Sons, 3e, 1998

JAKUBIAK R; CUELLAR, H., JAKUBIAK R. R., FARIA, R. A.; **The importance of nuclear forensics against terrorism related radioactive and nuclear material illicit trafficking and smuggling**; International Joint Conference RADIO 2019, São Paulo, 2019

KHAZHMURADOV M.A., KOCHNEV N.A., FEDORCHENKO D.V.; **PIN Photodiodes For Gamma Radiation Measurements**, R&I, No4, 2012

KAINKA, B.; **Measure Gamma Rays with a Photodiode**, Elektor Magazine, 2011

KNOLL G. F; **Radiation Detection and Measurement**, John Willey&Sons, 3e, 2001

LANDA SYSTEMS, **Radkeeper Personal**. Disponível em: < <http://radkeeper.com>>. Acesso em: 22 Ago 2019

LOY J.; **From london to Bordeaux: information on the international conference on nuclear security (London, March 2005)**, Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency, Miranda, Australia, 2011

MAYER, K. **Security: Expand nuclear forensics**, *Nature* 503, 461–462, 2013 World nuclear Association, **Radioactive Waste Management**, updated April 2018. Disponível em <<https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-wastes/radioactive-waste-management.aspx>>. Acessado em: 22 Ago. 2019.

MOUSER ELECTRONICS, Disponível em <br.mouser.com> Acessado em 01 Dez 2019.

MÜLLGES K. 10. August 1994: **Plutonium auf dem Münchner Flughafen**, Deutschlandfunk, 2014.

NAZÁRIO M., Khoury H., Hazin C.; **Calibração de equipamentos de radioproteção com Radiação gama no laboratório de metrologia das radiações Ionizantes - DEN/UFPE; METROLOGIA-2003 – Metrologia para a Vida**, Sociedade Brasileira de Metrologia (SBM) Recife, Pernambuco, 2003

OLIVEIRA C. N.P., KHOURY H.J., SANTOS., E.J.P; **PiN photodiode performance comparison for dosimetry in radiology applications**, *Physica Medica*, Vol 32, P. 1495-1501, 2016

OPENGEIGER; 2019. Disponível em: < <http://www.opengeiger.de/>>. Acessado em 28 Abr 2019

PODGORSAK, E.B. et al; - **Radiation oncology physics: a handbook for teachers and students**; IAEA, 2005.

RADKEEPER; **Radkeeper Personal**. Disponível em <<http://radkeeper.com>>. Acessado em 28 Abr 2019

SANGEETA D. *et al*; **Silicon PIN Diode for detection of electrons, alphas, X-rays and gamma rays**, *Proceedings of the DAE-BRNS Symp. on Nucl. Phys.* 60, 2015

SOARES, C. C; **Implicações jurídico-penais do acidente com o Césio-137**, Conferência Internacional sobre o Acidente Radiológico de Goiânia - 10 anos depois, Goiânia, 1997

SOLID STATE DEVICES, **SPD9441 Radiation Detector PIN Diode**, Datasheet, SSDI, 2011

SPECHTECH, **Model ST360 Radiation Counter**. Disponível em:553
<<http://www.spectrumtechniques.com/wp-content/uploads/2016/12/ST360Manual.pdf>>. Acessado em: 28 Abr 2019

TEXAS INSTRUMENTS, **LM118-N/lm218-N/LM318-N Operational Amplifiers**, Datasheet. Disponível em: < <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm318-n.pdf>>. Acessado em: 14 Out 2019

VAQUEIRO-CONTRERAS M. *et al*; **Identification of the mechanism responsible for the boron oxygen light induced degradation in silicon photovoltaic cells**, J. Appl. Phys. 125, 185704, 2019

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, **Radioactive Waste Management**, updated April 2018. Disponível em: <<https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-wastes/radioactive-waste-management.aspx>>. Acessado em: 22 Ago. 2019.