UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FÍSICA

Rick Bruno da Silva Cavalcante

Investigação do uso de sensores fotográficos de dispositivos celulares como detector contador de radiação gama

Rio de Janeiro
2023

Rick Bruno da Silva Cavalcante

Investigação do uso de sensores fotográficos de dispositivos celulares como detector contador de radiação gama

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Bacharel em Física Médica.

Orientador: Dr. Davi Ferreira de Oliveira

Rio de Janeiro

2023

CIP - Catalogação na Publicação

C376i Cavalcante, Rick Bruno da Silva Investigação do uso de sensores fotográficos de dispositivos celulares como detector contador de radiação gama / Rick Bruno da Silva Cavalcante. -Rio de Janeiro, 2023.
19 f.

Orientador: Davi Ferreira de Oliveira.
Trabalho de conclusão de curso (graduação) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Física, Bacharel em Física Médica, 2023.

1. Metrologia das radiações ionizantes. 2. Sensores fotográficos CMOS. 3. Radiação gama. 4. Detector contador. I. Oliveira, Davi Ferreira de, orient. II. Título.

Elaborado pelo Sistema de Geração Automática da UFRJ com os dados fornecidos pelo(a) autor(a), sob a responsabilidade de Miguel Romeu Amorim Neto - CRB-7/6283.

Rick Bruno da Silva Cavalcante

Investigação do uso de sensores fotográficos de dispositivos celulares como detector contador de radiação gama

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Bacharel em Física Médica.

Data de aprovação: 28/11/2023

Dr. Davi Ferreira de Oliveira (Orientador) – PEN/COPPE/UFRJ

Documento assinado digitalmente
DANIEL DE MIRANDA SILVEIRA
Data: 27/12/2023 12:23:54-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Dr. Daniel Miranda Silveira – IF/UFRJ

Dr. Anderson Gomes de Paula – PEN/COPPE/UFRJ

AGRADECIMENTOS

À minha mãe Maria Adelaide por todo o amor e apoio dado que permitiu meu ingresso e formação na melhor universidade do Brasil.

À minha irmã Bruna Kelly, sobrinha Clara, tia Sandra, e primo Nicolas por fazerem parte da minha família e pelo apoio.

Ao meu namorado Pedro pelo seu amor e motivação durante o curso.

Ao meu melhor amigo e futuro advogado Gabriel Henrique.

À minha amiga Lorena que foi uma pessoa maravilhosa.

À minha amiga Ana Raquel que foi a melhor pessoa que conheci nessa graduação.

Ao meu orientador Prof. Davi por toda a orientação que irá além desse trabalho.

Aos físicos médicos que orientaram durante os estágios e mostraram o melhor lado da profissão.

Aos pesquisadores e técnicos do LIN por me receberem e permitirem que meu trabalho ocorresse.

À Lady Gaga por guiar a trilha sonora de toda minha graduação e vida por mais de dez anos.

RESUMO

Os dispositivos celulares são quase onipresentes na vida da população, sendo ferramentas poderosas e de constante evolução em termos de seus componentes e funcionalidades. Um dos principais componentes dos celulares são os seus sensores fotográficos, projetados para transformar a luz visível proveniente da cena fotografada em sinais elétricos, que são processados e convertidos em dados digitais, permitindo a reprodução precisa da imagem capturada no dispositivo. A natureza semicondutora oferece a eles também a capacidade de detecção de radiações mais energéticas do que a luz visível, como a luz ultravioleta, raios-x e raios gama.

Por não serem projetados para a finalidade de medição de radiação ionizante, esses sensores oferecem diversas limitações que os tornam pouco acurados para serem utilizados como detectores padrão; porém, podem ser uma alternativa imediata, emergencial e provisória em casos de acidentes radiológicos e nucleares, possibilitando a imediata detecção de radiação e, por conseguinte, a mitigação de danos à saúde da população ao identificar a presença da radiação ionizante e alertando para que ela seja evitada.

Existem no mercado alguns aplicativos que prometem utilizar da propriedade de detecção de radiação ionizante para medição de taxa de contagem e taxa de dose, sendo um deles o RadioactivityCounter que é aplicado nesse trabalho.

Este estudo utilizou quatro dispositivos celulares distintos para investigar como os seus sensores fotográficos respondem, quando expostos à radiação gama. Para isso, foram realizadas medições em diversas condições de exposição, variando a energia da radiação incidente e a taxa de incidência. Essa abordagem permitiu a classificação da eficiência relativa de cada dispositivo, a determinação de suas precisões e a comprovação de que são sensíveis à radiação gama.

Palavras-chave: metrologia das radiações ionizantes; sensores fotográficos CMOS; radiação gama; detector contador.

ABSTRACT

Smartphones are nearly ubiquitous in people lives, serving as powerful tools that are constantly evolving in terms of their components and functionalities. One of the main components of smartphones is their photographic sensors, designed to trasform visible light coming from the photographed scene into electrical signals. These signals are processed and converted into digital data, enabling the accurate reproduction of tge captured image on the device. Due to their semiconductor nature, they also have the ability to detect more energetic radiations than visible light, such as ultraviolet light, x-rays, and gamma rays.

While these sensors are not designed for ionizing radiation measurement purposes, they do have several limitations that make them less accurate for use as reference detectors; nevertheless, they can serve as an immediate, emergency, and temporary alternative in cases of radiological and nuclear accidents, allowing for the mitigation of health risks by identifying the presence of ionizing radiation and issuing alerts to avoid it.

Some apps available in the market promise to utilize the property of ionizing radiation detection for measuring counting rates and dose rates, and one of them is the RadioactivityCounter, which was employed in this study.

This study employed four different smartphones to investigate how their photographic sensors respond when exposed to gamma radiation. To achieve this, measurements were conducted under various exposure conditions, varying the energy of incident radiation and the incidence rate. This approach allowed for the classification of the relative efficiency of each device, the determination of their precision, and the confirmation that they are sensitive to gamma radiation.

Keywords: ionizing radiation metrology; CMOS imaging sensor; gamma radiation; counter detector.

LISTRA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Pocket Geiger (Tipo 4)....8
Figura 2 - Esquema simplificado de um CIS....15
Figura 3 - Imagem obtida em um campo de radiação de 10 Sy/h. 19
Figura 4 - Recorte de imagem produzida pela exposição do CIS a uma fonte de Am-241.....20
Figura 5 - Tabela de calibração para diversos dispositivos disponível no site da desenvolvedora 21
Figura 6 - Tela inicial do RadioactivityCounter. 21
Figura 7 - Aparato experimental....22
Figura 8 - Imagens obtidas com o CIS coberto por fita isolante. 22
Figura 9 - Dispositivo 2 sendo irradiado pela fonte de Cs-137. 26
Figura 10 - Montagem experimental utilizando a fonte de Am-241. 31
Figura 11 - Posicionamento do dispositivo 2 em relação a fonte de Am-241. 31

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificações dos sensores dos dispositivos celulares utilizados. 18
Tabela 2 - Características das fontes utilizadas no trabalho. 18
Tabela 3 - Valores de n para cada dispositivo. 25
Tabela 4 - Valores medidos para a fonte de Cs-137 25
Tabela 5 - Valores obtidos pela regressão linear do DPM para a fonte de Cs-137. 26
Tabela 6 - Valores dos coeficientes lineares para a eficiência relativa para a fonte de Cs-137. 26
Tabela 7 - Valores medidos para a fonte de Am-241. 30
Tabela 8- Valores obtidos pela regressão linear de DPM para a fonte de Am-241. 30
Tabela 9 - Valores dos coeficientes lineares para a eficiência relativa para a fonte de Am-241. 31
Tabela 10 - Valores de precisão relativa obtidos para cada DC 35

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CCD	Dispositivos de carga acoplada / Charged-coupled device
CCTV	Sistemas de vigilância por imagem / closed-circuit television
CIS	Sensor fotográfico CMOS / CMOS image sensor
CM	Contagem média
CMOS	Semicondutor de Óxido Metálico Complementar / Complementary metal-oxide-semiconductor
COC	Comprimento de onda de corte
COPPE	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia
DC	Dispositivo Celular
DP	Desvio padrão
DPM	Desvio padrão em relação à média
IAEA	Agência Internacional de Energia Atómica / International Atomic Energy Agency
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LIN	Laboratório de Instrumentação Nuclear
n	Nível de ruído
PEN	Programa de Engenharia Nuclear
PR	Precisão relativa
S-F	Distância entre o sensor e a fonte

SUMÁRIO

1 Introdução 7

2 Revisão Bibliográfica 10

3 Fundamentação teórica 12

3.1 Radiação Ionizante 12

3.2 Átomo 12

3.3 Decaimento radioativos 12

3.3.1 Decaimento beta positivo 13

3.3.2 Decaimento beta negativo 13

3.3.3 Decaimento alfa 13

3.3.4 Decaimento gama 13

3.4 Interação da radiação eletromagnética com a matéria 13

3.4.1 Absorção fotoelétrica 13

3.4.2 Espalhamento Compton 13

3.4.3 Produção de pares 14

3.5 Sensores fotográficos 14

4 Materiais e métodos 18

4.1 Dispositivos celulares 18

4.2 Fontes e Laboratório 18

4.3 Radioactivy Counter 18

4.4 Experimento 21

4.5 Análise 23

4.5.1 Software 23

4.5.2 Desvio padrão em relação à média 23

4.5.3 Eficiência relativa (ER) 23

4.5.4 Precisão relativa 24

5 Resultados 25

5.1 Fonte de Cs-137 25

5.2 Fonte de Am-241 29

5.3 Comparativo entre fontes. 35

6 Conclusões e sugestões 36

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 37

1 Introdução

Os dispositivos celulares (DC) estão cada vez mais presentes na rotina da população global. Em 2022 a quantidade de tais dispositivos ultrapassava a de pessoas no Brasil (FGV, 2022), e devido a avanços tecnológicos da indústria, estes dispositivos estão em constante aprimoramento, utilizando componentes de alta performance que ampliam e criam novas possibilidades de uso.

Um dos componentes dos DC que mais atrai a atenção do público são os sensores fotográficos, o que não passa despercebido pelas fabricantes, que investem constantemente em sensores mais avançados e com diversos propósitos, comumente embarcando até cinco desses sensores por DC.

Os sensores fotográficos dos DC são desenvolvidos para a captura de imagens formadas por luz visível, porém sua composição de fotodiodo semicondutor os torna sensíveis a um espectro de radiação eletromagnética muito mais amplo, abrangendo parte do espectro da radiação infravermelho, até os raios x e gama (Stefanov, K. D., 2022).

Os sensores do tipo semicondutor de óxido metálico complementar (CMOS) são os mais utilizados para fotografia nos DC, e possuem aplicações também na área de metrologia das radiações ionizantes, sendo utilizados como detectores em procedimentos de radiografia médica e industrial, tendo vantagens como detecção direta, boa resolução espacial e sensibilidade quando comparados as principais tecnologias do mercado como filmes e dispositivos de carga acoplada (CCD) (Guerrini, N. C., 2019).

O uso de dispositivos fotográficos para detecção de radiação gama é algo pouco difundido porém já explorado comercialmente em baixa escala, existindo soluções como a GammaPix, patenteada pela Image Insight Inc. e apoiada pelos departamentos de defesa e de segurança dos Estados Unidos da América, que utiliza de sistemas de vigilância por imagem (CCTV) para monitorar a presença de fontes de radiação em espaços públicos, existindo também a aplicação da mesma tecnologia para a medição de radiação ionizante utilizando apenas o DC.

Os DC cumprem um papel importante na sociedade em casos de emergência, havendo a propagação de informações sobre situações de perigo entre os usuários de redes sociais, recebendo alertas de sistemas governamentais como o Wireless Emergency Alerts dos Estados Unidos da América, dentre outros. Aos DCS pode ser atribuído também o papel de aliado da proteção em acidentes radiológicos e nucleares, funcionando como um estimador de segurança a cerca a exposição à radiação ionizante.

Recentemente, em 2011 houve um acidente nuclear no Japão na usina nuclear de Fukushima Daiichi, que ao ser atingida por um terremoto seguido por um tsunami, teve a capacidade de resfriamento de suas unidades comprometidas, resultando no sobreaquecimento e explosão nas unidades 1 e 3, o que levou à liberação de material nuclear que contaminou solo, ar e mar. Mais de 160 mil pessoas em uma região de raio de 30 km em volta da usina precisaram evacuar suas casas devido a contaminação ambiental (IAEA, 2015).

Após o acidente de Fukushima houve alta demanda de dispositivos de monitoração de radiação pela população atingida, porém eles não eram acessíveis devido ao custo elevado e dificuldade de obtenção e uso (Ishigaki *et al.*, 2013). Como solução, poucos meses após o acidente foi desenvolvido um dispositivo detector de radiação ionizante de baixo custo, cerca de 24 dólares americanos em seu lançamento, que para funcionar precisava ser acoplado a um DC iPhone, responsável pela leitura e exibição dos dados coletados. O dispositivo chamado de Pocket Geiger, que pode ser visto na figura 1, teve 12 mil unidades vendidas em seus seis primeiros meses de venda, chegando à marca de 100 mil unidades em 2020. A adoção do dispositivo resultou na produção de bancos de dados alimentado pelos seus usuários sobre níveis de radiação em diversas regiões afetadas pelo acidente (Isigaki *et al.*, 2015).

Figura 1 - Pocket Geiger (Tipo 4).

Dispositivo Pocket Geiger (Tipo 4) conectado a um DC, com sua placa exposta ao lado de sua carcaça. Apesar do nome, o detector utilizado é de tipo semicondutor. Fonte: Ishigaki, Y. *et al.,* 2015.

O exemplo do Pocket Geiger evidencia o interesse do público em querer medir radiação e garantir sua segurança em casos de acidentes nucleares e radiológicos, com a possibilidade de realizar essas tarefas utilizando apenas o sensor fotográfico de seu DC podemos ter adoção facilitada e ampla da sociedade, o que pode resultar em acidentes com

exposições menos intensas, logo de menor impacto na saúde, servindo como um mecanismo de radioproteção.

Esse trabalho possui como objetivo estudar a capacidade de detecção de radiação gama por sensores fotográficos de tipo CMOS e seu comportamento de resposta, sendo determinada a eficiência relativa entre os sensores e suas precisões.

2 Revisão Bibliográfica

São escassos os trabalhos que investigam as propriedades de detecção de radiação ionizante pelos DC. Nessa seção, será apresentada uma seleção de trabalhos que apresentaram contribuições importantes para esse tema.

Olivier Van Hoey *et al.* (2015) realizaram testes com quatro aplicativos calibrados para medição de taxa de dose e dois aplicativos para medição de taxa de contagem utilizando quatro DC do mesmo modelo. Os resultados mostraram que, para todos dispositivos e aplicativos, um tempo de medição mínimo de 10 a 25 minutos foi necessário para obter resultados confiáveis, sendo esse tempo também dependente da taxa de dose. Para os valores de taxa de dose, houve variações de -80% a +50% entre os aplicativos em relação a valores de referência. Além disso, o estudo demonstrou que a resposta dos sensores é dependente da energia dos fótons incidentes e que essa dependência diminui à medida que a energia aumenta. Também se verificou que as medições são sensíveis ao ângulo de exposição do sensor em relação à fonte, com variações de até 10% ao rotacionar o DC. O aplicativo Radioactivity Counter foi o mais preciso entre todos os testados.

Han Gyu Kang *et al.* (2016) desenvolveram um algoritmo com o objetivo de estudar o comportamento dos sensores fotográficos dos DC para dosimetria médica. Foi mostrado que a estratégia de medir as intensidades dos pixels onde houve a detecção da radiação é superior que a abordagem de medir a quantidade destes pixels, existindo uma resposta mais uniforme para diferentes valores de dose. Suas demais conclusões estando de acordo com Olivier Van Hoey *et al.* (2015).

Qing-Yang Wei *et al.* (2017) desenvolveram um aplicativo para medição de dose e taxa de dose em tempo real. Diferente dos algoritmos utilizados por outros aplicativos, o de Wei *et al.* possuiu a vantagem de realizar as medições sem ser necessário o bloqueio de entrada de luz visível no sensor, sendo apenas necessário que se encontrasse sob uma visão estática.

Alessia Mafodda e Clemens Woda (2020) realizaram a análise do aplicativo RadioactivityCounter utilizando uma ampla gama de dispositivos. Foram obtidos resultados que entraram em concordância com Olivier Van Hoey *et al.* (2015), e devido a análise ter ocorrido com uma ampla quantidade de DC, 14 no total, foi possível a realização de novas conclusões. Os dispositivos puderam ser divididos em dois grupos, os de menor ruído do sensor, $n<10$, e os de maior ruído, $n>10$. Para o primeiro grupo de dispositivos, obteve-se que o limiar ótimo de medição de taxa de dose foi de 2 $\mu Gy\ h^{-1}$, enquanto para o segundo grupo variou entre 20 e 50 $\mu Gy\ h^{-1}$. Outra conclusão importante foi que os sensores de baixo ruído

apresentaram correções durante o pré-processamento das imagens, que identificavam as interações da radiação com o sensor em casos de baixa taxa de dose como ruído, sendo eliminados das imagens analisada pelo RadioactivityCounter, aumentando assim o limiar de detecção do sistema.

3 Fundamentação teórica

3.1 Radiação Ionizante

Radiações ionizantes são caracterizadas pela capacidade de excitar e ionizar átomos ao interagir (Attix, 2004). Os elétrons mais fáceis de serem ejetados durante o processo de ionização são aqueles pertencentes a camada de valência do átomo, consequência de serem os elétrons com menor energia de ligação ao átomo, e a partir disso podemos definir um limiar de energia para as radiações ionizantes, que varia de acordo com o elemento químico, porém em uma faixa de 3,9 eV a 24,6 eV (Okuno, 2010). No caso das radiações eletromagnéticas, tem-se que o limiar se localiza dentro do espectro da radiação ultravioleta, que possui valor máximo de energia de 12,42 eV, porém na metrologia das radiações ionizantes são consideradas apenas as radiações mais energéticas de tipo x e gama (Knoll, 1999).

3.2 Átomo

O átomo consiste em um núcleo pequeno e denso onde se encontram os nêutrons e prótons, sendo circundado por um de uma nuvem de elétrons que é responsável pela maior porção do volume total do átomo.

Os prótons que constituem o núcleo atômico são partículas positivamente carregadas, e por conta disso, se repelem através de forças coulombianas, o que torna o núcleo instável, porém para contrabalancear essas interações existem os nêutrons, partículas de carga elétrica neutra e que através da força nuclear forte mantém o núcleo unido.

Dentro do núcleo é importante que haja equilíbrio entre as forças coulombiana e a nuclear forte, se isso não ocorrer, o núcleo é instável, e busca estabilidade ao realizar decaimentos radioativos, processo onde ocorrem transformações em suas partículas e liberação de energia.

Os elétrons são partículas de carga elétrica negativa e que se mantém presas ao átomo devido a interação colombiana atrativa com o núcleo positivo. Em decorrência da natureza quântica dos elétrons, eles se encontram em estados de energia de valores discretos e descritos por quatro números quânticos (n, l, ml e ms).

3.3 Decaimento radioativos

Os decaimentos radioativos podem ser descritos pela equação 1, onde temos um núcleo instável X que após um decaimento ele se torna em um núcleo Y e junto ocorre a emissão de energia E.

$$X \rightarrow Y + E \tag{1}$$

3.3.1 Decaimento beta positivo

Nesse decaimento temos um núcleo com excesso de prótons, que para atingir o equilíbrio, o transmuta em um nêutron. Durante o processo a energia é emitida através das partículas betas positivas, também conhecidas como pósitrons, e dos neutrinos, como pode ser visto na equação 2.

$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}_{Z-1}^{A}Y + e^{+} + \nu \qquad (2) $$

3.3.2 Decaimento beta negativo

Nesse decaimento temos um núcleo com excesso de nêutrons, que para atingir o equilíbrio, o transmuta em um próton. Durante o processo a energia é emitida através das partículas betas negativas, também conhecidas como elétrons, e dos antineutrinos, como pode ser visto na equação 3.

$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}_{Z+1}^{A}Y + e^{-} + \bar{\bar{\nu}} \qquad (3) $$

3.3.3 Decaimento alfa

Quando um núcleo pesado, comumente com Z > 82 (Eisberg, 1979), se encontra instável, o processo de decaimento alfa começa a ser favorável de ocorrer. Nesse tipo de decaimento, o núcleo X decai em um núcleo Y junto com a emissão de partículas alfas, que são equivalentes a átomos de hélio completamente ionizados, e que carregam a energia liberada pelo núcleo.

$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A-8}_{Z-4}Y + {}^{4}_{2}He^{+2} \qquad (4) $$

3.3.4 Decaimento gama

Após acorrer um decaimento como os citados anteriormente, o núcleo resultante pode se encontrar em um estado energético excitado, e para chegar no seu estado fundamental ele emite radiação eletromagnética gama, como pode ser visto na equação 5.

$$ {}^{A}_{Z}X^{*} \rightarrow {}^{A}_{Z}X + \gamma \qquad (5) $$

3.4 Interação da radiação eletromagnética com a matéria

3.4.1 Absorção fotoelétrica

Nesse processo, um fóton interage com um átomo, resultando na transferência de toda a sua energia para um elétron do átomo, que então é ejetado com energia cinética igual a diferença entre a energia do fóton e a energia de ligação do elétron ejetado ao átomo. Esse efeito predomina em meios de Z (número atômico) alto e fótons de baixa energia, com sua probabilidade de ocorrência decaindo com o inverso do cubo da energia do fóton.

3.4.2 Espalhamento Compton

O espalhamento Compton é um processo no qual um fóton, ao interagir com um elétron livre, ou de baixa energia de ligação em comparação com o fóton, é absorvido, com

sua energia sendo dividida entre o elétron e um novo fóton de menor frequência. A probabilidade de ocorrência desse processo está ligada à densidade eletrônica do meio, ao contrário da absorção fotoelétrica, onde a probabilidade está relacionada ao valor de Z.

3.4.3 Produção de pares

A produção de pares é um processo que ocorre quando um fóton de alta energia ao interagir com um núcleo de Z alto, resultando na absorção do fóton e na conversão de sua energia em um par de partículas, um elétron e um pósitron. Devido a conservação de energia, para que esse efeito ocorra é necessário que o fóton possua energia mínima igual à soma das energias de repouso das partículas, cerca de 1,022 MeV.

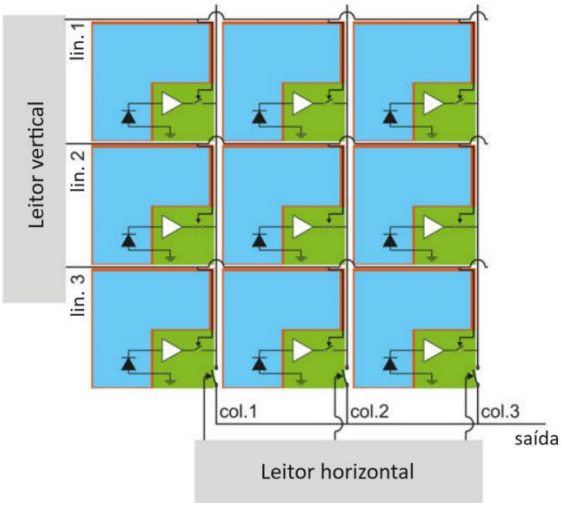
3.5 Sensores fotográficos

Os sensores fotográficos presentes nos DC têm diversas aplicações, sendo a principal delas o registro de momentos na vida do usuário. Eles atuam como transdutores, capturando a radiação luminosa que forma uma imagem e transformando-a em sinais elétricos. Esses sinais, ao serem registrados, possibilitam a reconstrução da imagem original.

Atualmente, os sensores fotográficos mais amplamente utilizados são os CCD e CMOS, sendo este último o tipo predominante em DC, devido ao seu baixo custo, consumo de energia reduzido e tamanho compacto (Teubner, U. Brükner, H. J., 2019).

O Sensor Fotográfico CMOS (CIS) consiste em uma matriz de fotodiodos semicondutores que detectam a distribuição de irradiância na superfície do sensor (Bhaknik, V.; Schindelbeck, O. S, 2021). Na figura 2, é apresentado um esquema simplificado do CIS, onde cada fotodiodo está localizado em um elemento da matriz chamado de pixel. Além disso, cada pixel incorpora eletrônica responsável por converter e amplificar o sinal gerado pelo fotodiodo. Complementando o CMOS, existem também dispositivos que permitem a leitura independente de cada pixel.

Figura 2 - Esquema simplificado de um CIS.



Fonte: Adaptado de Teubner, U. Brükner, H. J. (2019).

No CIS, fotodiodo é o componente responsável pela detecção da radiação incidente, absorvendo total ou parcialmente sua energia e transformando-a em carga elétrica. Para a descrição do processo de detecção da radiação, consideraremos o silício como material do fotodiodo, dado que ele é o mais prevalente em CIS em comparação a outros materiais semicondutores.

Quando um fóton interage com o semicondutor, ele pode ser absorvido completamente devido ao efeito fotoelétrico, espalhado devido ao efeito Compton ou causar a produção de pares. Caso ocorra a deposição de pelo menos uma quantidade de energia E_g em um elétron da camada de valência do material, ele é excitado, resultando na formação de um par elétron-buraco. Esse par consiste em um elétron na camada de condução do material e uma vacância na camada de valência.

A energia mínima necessária para que ocorra a emissão do elétron é a diferença entre as energias da camada de condução (E_c) e da camada de valência (E_v), como visto na equação 6. Fótons com energia insuficiente não interagem com a região sensível do fotodiodo. O excesso de energia dos elétrons emitidos é dissipado, levando à geração de novos pares elétron-buraco e/ou à produção de calor (Stefanov, K. D., 2022).

$$E_g = E_c - E_v \tag{6}$$

Dentro do espectro da luz visível, cada fóton é capaz de produzir apenas um par elétron-buraco, sendo necessário pelo menos três vezes o valor de E_g do silício para a produção de um par duplo. A partir de 50 eV a 300 K, a quantidade de pares elétron-buraco pode ser estimada pela equação 7, supondo que toda energia é absorvida.

$$N_{e-b} = \frac{E_{fóton}}{3{,}65\ eV} \tag{7}$$

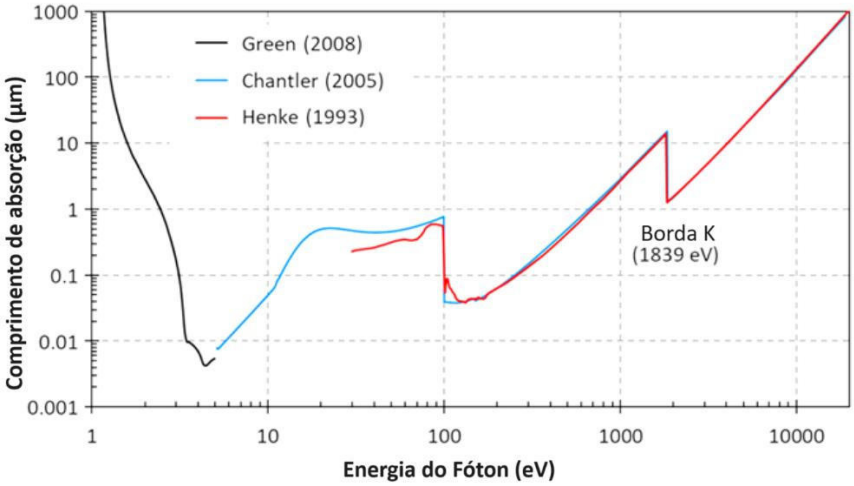
Considerando que o Silício possui E_g = 1.12 eV a 300 K, o limite de detecção é dado pela radiação de comprimento de onda máximo de 1107 nm, que é chamada de comprimento de onda de corte (COC).

A eficiência de absorção de um comprimento de onda por um meio semicondutor comumente é analisada por meio de uma grandeza chamada comprimento de absorção (X_0), que representa a distância necessária para que o fluxo de fótons seja atenuado em 63%, o que corresponde a um fator de 1/e. X_0 está relacionado ao coeficiente de absorção do meio (α) pela equação 8.

$$X_0 = \frac{1}{\alpha} \tag{8}$$

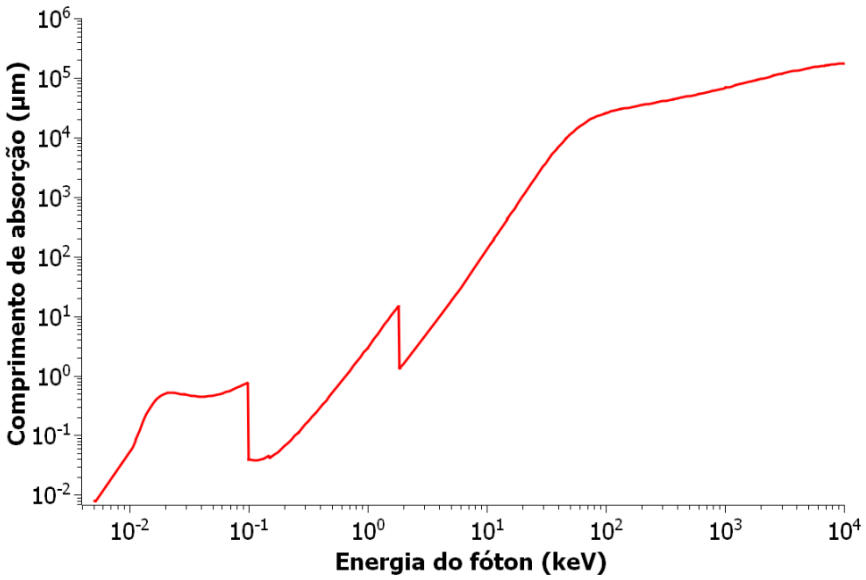
Na Figura 3, é possível visualizar X_0 no silício, abrangendo desde o COC presente no espectro do infravermelho até raios X, com aproximadamente 20 keV de energia. Na Figura 4, temos o mesmo espectro, porém iniciando a partir de 40 eV e se estendendo até a energia de 10 MeV. É interessante observar que o espectro da luz visível, que varia de cerca de 2 eV (vermelho) a 3,2 eV (violeta), apresenta valores de X_0 relativamente baixos, não ultrapassando 10 µm. Por outro lado, raios gama emitidos por uma fonte de Cs-137 com energia de 661 keV requerem cerca de 5 cm para serem absorvidos com a mesma proporção.

Gráfico 1 - Comprimento de absorção para o silício com valores de α obtido de diversas fontes.



Fonte: Adaptado de Stefanov, K. D. (2022).

Gráfico 2 - Comprimento de absorção para fótons de energia entre 40 eV e 10 MeV.



Fonte: Autor. Dados disponíveis em: https://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html. Acesso em: 05/10/2023.

Os fotodiodos dos CIS de DC possuem de 2 µm a 3,7 µm de profundidade (Fontaine, 2019), tornando-os ideais para a detecção de luz visível. Em contrapartida, os raios gama são mais difíceis de detectar e demandam grandes períodos de aquisição.

Radiações compostas por partículas, como elétrons, também podem ser detectadas usando CIS, no entanto, tais processos não são o foco deste trabalho, que se concentra na detecção de radiação eletromagnética do tipo gama.

Seguido da detecção da radiação, temos processo de coleção de cargas geradas, que inicia através da aplicação de um campo elétrico sobre o fotodiodo, atraindo a carga desejada, sejam os elétrons ou buracos, para a eletrônica presente no pixel, que resulta em um pulso elétrico de amplitude proporcional à quantidade de cargas coletadas, e que ditará a intensidade do brilho de cada pixel.

Por fim os leitores verticais e horizontais do CIS, como vistos em cinza claro na figura 2, realizam a varredura dos sinais gerados por cada pixel presentes na matriz, que quando combinados, resultam na produção de uma imagem.

4 Materiais e métodos

4.1 Dispositivos celulares

Para a realização do trabalho foram utilizados quatro DC, todos da mesma fabricante, porém de modelos diferentes, rodando o sistema operacional Android com versões variadas da 10 a 13.

Cada aparelho utilizado possui uma configuração de três a cinco sensores fotográficos diferentes, porém devido às limitações de software do sistema operacional e do aplicativo utilizado, foi possível a realização das medições utilizando apenas o sensor principal do aparelho, presente na parte traseira e com especificações presentes na tabela XX.

Tabela 1 - Especificações dos sensores dos dispositivos celulares utilizados.

Modelo	Dispositivo	Sensor	Resolução (MP)	Tamanho Pixel (μm)
S21	1	ISOCELL HM3	108	0.8
S20	2	ISOCELL 2LD	12	1.8
M20	3	ISOCELL 3L6	13	1.12
S23	4	ISOCELL GN3	50	1.0

Fonte: Samsung. Disponível em: https://semiconductor.samsung.com/image-sensor/mobile-image-sensor. Acesso em: 01/09/2023.

4.2 Fontes e Laboratório

Para a exposição dos sensores serão utilizadas duas fontes de radiação gama com aberturas pequenas o suficiente para a intensidade do campo radiação cair com o quadrado da distância. Suas características estão descritas na tabela 2. Ambas as fontes pertencem ao Laboratório de Instrumentação Nuclear (LIN) do Programa de Engenharia Nuclear da COPPE (PEN/COPPE), onde também foram tomadas todas as medidas.

Tabela 2 - Características das fontes utilizadas no trabalho.

Fonte	Atividade (mCi)	Energia (keV)
Cs-137	51	661.657 (3)
Am-241	100	59.5412 (2)

Fontes: LIN; The Lund/LBNL Nuclear Data Search. Disponível em: https://nucleardata.nuclear.lu.se/. Acesso em: 15/10/2023.

4.3 Radioactivy Counter

Para a realização dos experimentos foi utilizada a versão 2.1 do aplicativo RadioactivityCounter.

O aplicativo foi desenvolvido pela MultiMediaStudio e está disponível para celulares de sistema operacional Android e iOS, com preço variado de R$ 11,00 a R$ 20,00 a depender da loja de aplicativos e da cotação do dólar no dia. A desenvolvedora descreve o aplicativo

como um software capaz de transformar celulares em contadores Geiger sem o uso de hardware adicional, sendo necessário para isso apenas o bloqueio da entrada de luz visível no sensor da câmera.

O funcionamento do aplicativo é baseado na capacidade de detecção de radiação ionizante por sensores de fotografia, que ao serem expostos, produzem imagens com ruídos nas regiões onde ocorreram a detecção da radiação ionizante; por exemplo, na imagem fotográfica digital de um irradiador gama contendo fontes de Co-60 e Cs-137, apresentada na figura 3, surgem artefatos de imagem na cor branca que decorrem da interação da radiação ionizante com o sensor de fotografia.

Figura 3 - Imagem obtida em um campo de radiação de 10 Sy/h.

Fonte: Multimedia studio. Disponível em: http://hotray-info.de/html/radioactivity.html. Acesso em: 15/10/2023. (A) Irradiador gama.

A quantificação da radiação, a partir do aplicativo, é dada pela contagem do número de pontos e traços são detectados nas imagens produzidas durante o período de aquisição. Devido a impossibilidade de distinção dos ruídos, devidos à luz visível e das radiações gama, é necessário que durante a aquisição o sensor fotográfico seja protegido da luz visível, sendo detectada apenas a radiação gama.

Na figura 4 temos uma amostra da imagem analisada pelo aplicativo, onde cada ponto branco é um candidato a contagem a ser considerado pelo aplicativo.

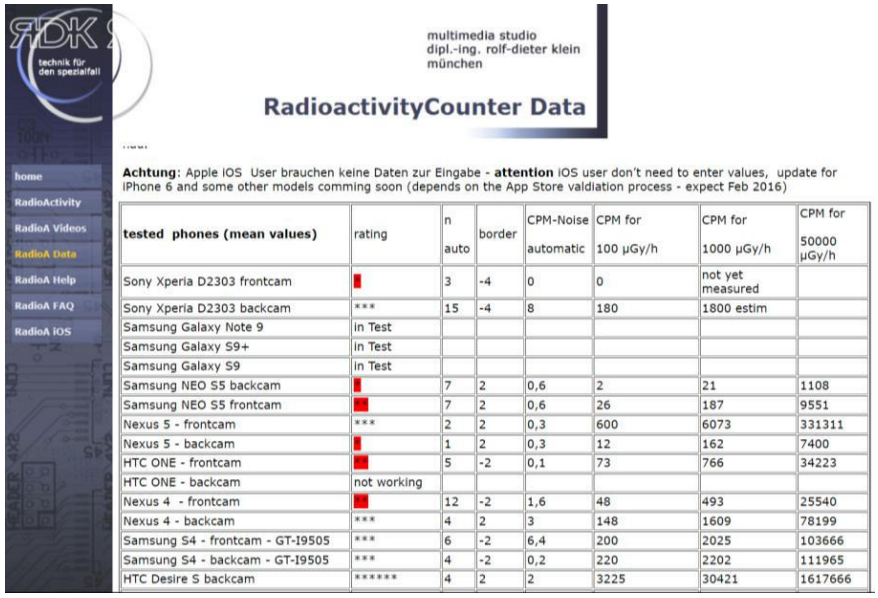
Figura 4 - Recorte de imagem produzida pela exposição do CIS a uma fonte de Am-241.

Fonte: Autor. O recorte representa 20% da imagem completa.

Além de contagens, o aplicativo também oferece a capacidade de medir taxa de dose, para isso, é necessário realizar uma calibração que relaciona o número de contagens registradas pelo aplicativo, em um período de um minuto, com a taxa de dose medida por um detector de referência sob mesmas de irradiação. O desenvolvedor disponibiliza tabelas com valores de calibração, para diversos dispositivos, em seu site, como pode ser visto na figura 5. No entanto, é importante observar que estas tabelas não conseguem dar conta da grande diversidade de dispositivos disponíveis no mercado. Além disso, as tabelas não passam por atualizações periódicas e, portanto, se limitam a dispositivos por vezes obsoletos.

O aplicativo possui interface simples e de fácil uso. Segue indicado na figura 6 a tela principal do aplicativo em que constam informações sobre as leituras que estão sendo realizadas, o dispositivo utilizado, a imagem em tempo real captada pelo sensor, além de possuir um menu para mudar a visualização dos dados, limpar ou salvar em registro as medições, e acessar suas configurações.

Figura 5 - Tabela de calibração para diversos dispositivos disponível no site da desenvolvedora



multimedia studio
dipl.-ing. rolf-dieter klein
münchen

RadioactivityCounter Data

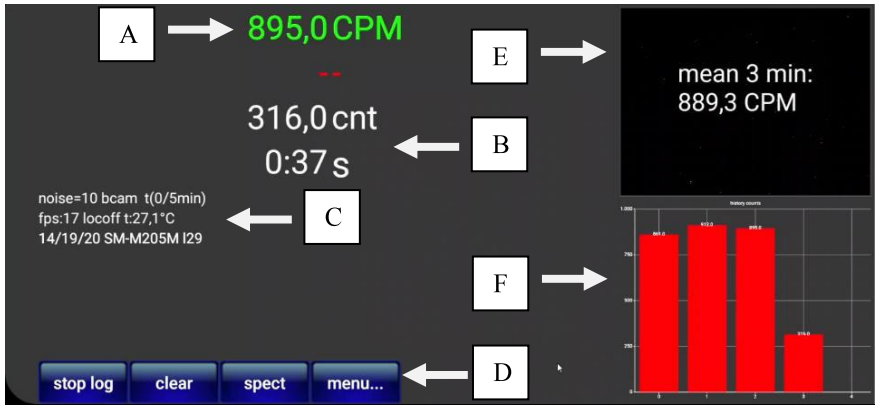
home
RadioActivity
RadioA Videos
RadioA Data
RadioA Help
RadioA FAQ
RadioA iOS

Achtung: Apple iOS User brauchen keine Daten zur Eingabe - **attention** iOS user don't need to enter values, update for iPhone 6 and some other models comming soon (depends on the App Store valdiation process - expect Feb 2016)

tested phones (mean values)	rating	n auto	border	CPM-Noise automatic	CPM for 100 µGy/h	CPM for 1000 µGy/h	CPM for 50000 µGy/h
Sony Xperia D2303 frontcam	*	3	-4	0	0	not yet measured	
Sony Xperia D2303 backcam	***	15	-4	8	180	1800 estim	
Samsung Galaxy Note 9	in Test						
Samsung Galaxy S9+	in Test						
Samsung Galaxy S9	in Test						
Samsung NEO S5 backcam	*	7	2	0,6	2	21	1108
Samsung NEO S5 frontcam	**	7	2	0,6	26	187	9551
Nexus 5 - frontcam	***	2	2	0,3	600	6073	331311
Nexus 5 - backcam	*	1	2	0,3	12	162	7400
HTC ONE - frontcam	**	5	-2	0,1	73	766	34223
HTC ONE - backcam	not working						
Nexus 4 - frontcam	**	12	-2	1,6	48	493	25540
Nexus 4 - backcam	***	4	2	3	148	1609	78199
Samsung S4 - frontcam - GT-I9505	***	6	-2	6,4	200	2025	103666
Samsung S4 - backcam - GT-I9505	***	4	-2	0,2	220	2202	111965
HTC Desire S backcam	******	4	2	2	3225	30421	1617666

Fonte: Multimedia studio. Disponível em: http://hotray-info.de/html/radioa_data.html. Acesso em: 15/10/2023.

Figura 6 - Tela inicial do RadioactivityCounter.



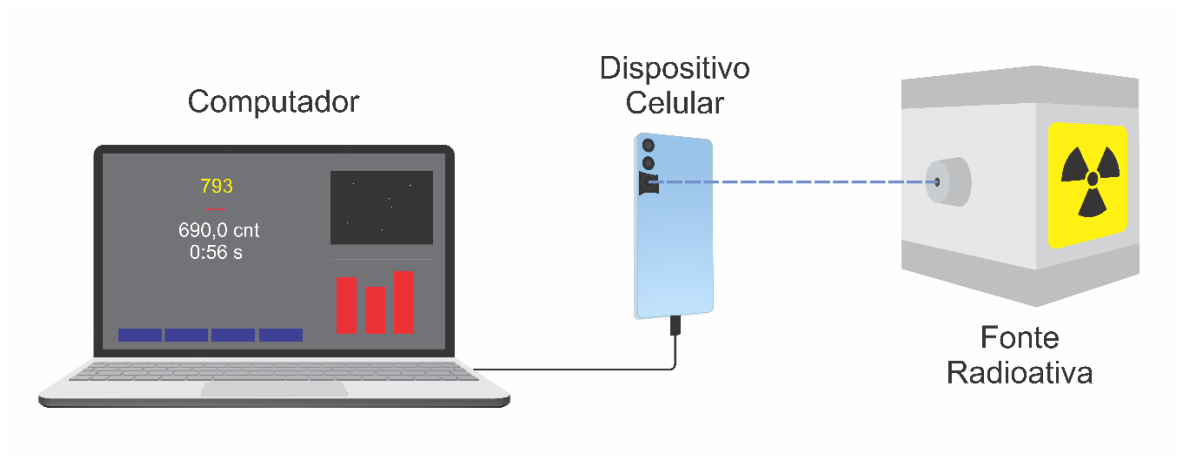
Fonte: Autor. Captura de tela do aplicativo RadioactivityCounter durante medição. (A) Valor da última medida realizada. (B) Valor de contagem e tempo restante da medida atual. (C) Informações do DC, CIS e medida atual. (D) Menu do aplicativo. (E) Imagem do CIS e valor médio de contagens. (F) Histograma de contagens das medidas realizadas.

Após a primeira inicialização do aplicativo, ele requer que seja realizada a medição do nível do ruído (n) do sensor fotográfico utilizado, que agrega ruído eletrônico e a radiação de fundo do ambiente. O processo foi realizado de forma automática para cada aparelho, levando um minuto para a conclusão da análise inicial, sendo repetida em sequência, porém com um período de 6 a 10 minutos.

4.4 Experimento

Para a realização do trabalho, cada DC foi irradiado por cada uma das fontes, em momentos distintos. Na figura 7 temos um esquema simplificado de como foram tomadas as medidas.

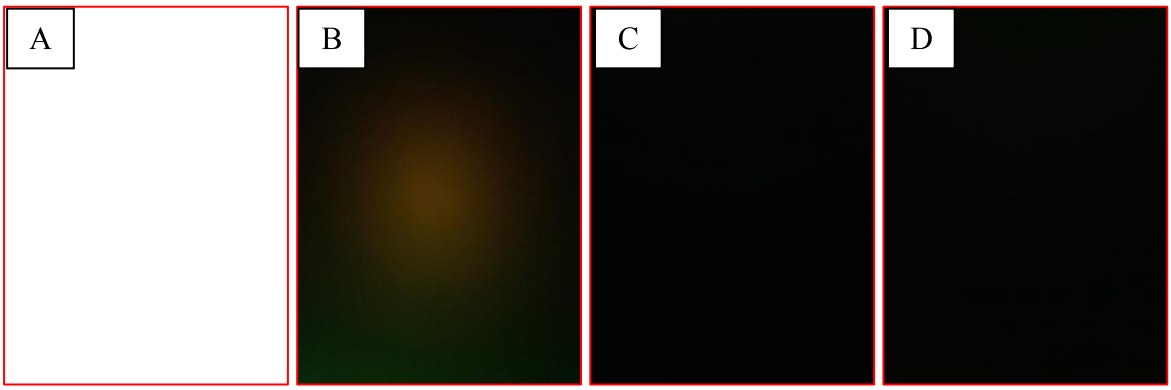
Figura 7 - Aparato experimental



Fonte: Autor. Contém elemento gráfico adaptado de Takeshi Ishikawa, retirado de https://www.vecteezy.com/vector-art/376614-laptop-computer-isolated-on-a-white-background-with-a-blank-screen.

Para o procedimento de irradiação, cada DC teve um de seus CIS coberto com quatro camadas de fita isolante preta para o bloqueio da entrada de luz visível no sensor, condição necessária para a realização das leituras. A quantidade de fita isolante foi determinada a partir de análise qualitativa de imagens produzidas com o sensor apontado para lâmpadas convencionais, sendo desejável uma imagem tão escura quanto possível. Na figura 8 temos imagens obtidas sob mesmas condições de exposição e aquisição, porém com diferentes quantidades de fita isolante.

Figura 8 - Imagens obtidas com o CIS coberto por fita isolante.



Fonte: Autor. Imagens obtidas após quatro segundos de aquisição. (A) Uma camada de fita isolante. (B) Duas camadas de fita isolante. (C) Três camadas de fita isolante. (D) Quatro camadas de fita isolante.

As medidas de contagem foram tomadas de forma para que a quantidade de radiação incidente no CIS dependesse apenas da distância sensor-fonte (S-F) em um eixo, respeitando a lei do inverso do quadrado da distância. Para isso, entre cada medida o sensor foi posicionado de forma alinhada ao centro da abertura do invólucro da fonte radioativa, que

segue indicado na linha pontilhada azul na figura 7, visando minimizar angulações para que o sensor pudesse estar na direção de máxima incidência do feixe.

Foram tomadas medidas em diferentes taxas de exposição para cada DC e fonte, para isso, variou-se S-F de 5 cm até 100 cm em um passo de 5 cm. O tempo de aquisição para cada medida foi de 60 segundos. Ao total foram realizadas 5 medidas consecutivas para cada posicionamento do DC.

Durante a tomada de medidas os DC foram controlados de forma remota através de um computador, tendo a conexão sendo feita através de um cabo de dados usb tipo c.

4.5 Análise

4.5.1 Software

Para armazenamento das medidas e realização de cálculos foi utilizado o programa Excel, parte do pacote Office 365. Para a realização dos gráficos e ajustes, empregou-se o software SciDavis na versão 2.8.

4.5.2 Desvio padrão em relação à média

O cálculo do desvio padrão em relação à média (DPM) foi realizado através da equação 9.

$$DPM_{x,i,k} = \frac{CM_{x,i,k}}{DP_{x,i,k}} \tag{9}$$

Onde:

- CM = contagem média;

- DP = desvio padrão;

- i = dispositivo i;

- k = fonte k;

- x = S-F do i com k.

A incerteza pôde ser estimada através da equação 10.

$$\sigma_{DPM_{x,i,k}} = \sqrt{\left(-\frac{CM_{x,i,k}}{{DP_{x,i,k}}^2} * \sigma_{DP_{x,i,k}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{CM_{x,i,k}}}{DP_{x,i,k}}\right)^2} \tag{10}$$

Onde:

σ_i = *incerteza de i*

4.5.3 Eficiência relativa (ER)

A eficiência de detecção de um dispositivo em relação a outro e normalizado pelas áreas dos sensores pôde ser calculado através da equação 11.

$$ER_{x,i,j,k} = \frac{CM_{x,i,k}}{CM_{x,j,k}} * \frac{A_j}{A_i} \tag{11}$$

Onde:

- CM = contagem média;

- DP = desvio padrão;

- i = dispositivo i;

- j = dispositivo j;

- k = fonte k;

- x = S-F dos i e j com k;

- A = área do CIS.

A incerteza foi estimada através da equação 12.

$$\sigma_{ERM_{x,i,j,k}} = \sqrt{\left(-\frac{CM_{x,i,k}}{{CM_{x,j,k}}^2} * \sigma_{CM_{x,j,k}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{CM_{x,i,k}}}{DP_{x,j,k}}\right)^2 * \frac{A_j}{A_i}} \quad (12)$$

Onde:

σ_i *= incerteza de i.*

O valor da área dos sensores foi estimado a partir da equação 13.

$$A_i = {p_i}^2 * R_i \quad (13)$$

Onde:

- p_i *= tamanho do pixel do CIS do dispositivo i;*

- R_i *= resolução do sensor do CIS do dispositivo i.*

4.5.4 Precisão relativa

A precisão relativa (PR) para um dispositivo *i* entre fontes diferentes foi calculada utilizando a equação 14.

$$PR = \frac{DP_{i,j}}{DP_{i,k}} \quad (14)$$

Onde:

- j = fonte j;

- k = fonte k.

5 Resultados

Para cada dispositivo foi obtido um valor de n, o que pode ser observado na tabela 3.

Tabela 3 - Valores de n para cada dispositivo.

Dispositivo	n
1	2
2	4
3	10
4	3

Fonte: Autor.

5.1 Fonte de Cs-137

Utilizando a fonte de Cs-137 foram obtidos valores de CM e DP em função de S-F expostos na tabela 4, e nos gráficos 3, 4 e 5, em que foram aplicados um ajuste não linear utilizando a equação $y = a / (x^2)$.

Tabela 4 - Valores medidos para a fonte de Cs-137.

Dispositivo	1		2		3	
S-F (cm)	Cm	DP	Cm	DP	Cm	DP
5 (1)	171	64	183	22	3560	100
10 (1)	63	29	1007	69	1999	51
15 (1)	35	23	4360	250	919	48
20 (1)	33	6	6150	230	303	15
25 (1)	35	16	5130	260	268	30
30 (1)	40	35	4170	170	147	26
35 (1)	16	16	3009	98	129	23
40 (1)	16	14	2353	52	55	15
45 (1)	25	18	1523	44	70	6
50 (1)	17	7	1450	130	41	13
55 (1)	5	9	1040	140	53	4
60 (1)	5	7	651	62	34	8
65 (1)	10	8	626	64	34	5
70 (1)	8	6	553	68	33	14
75 (1)	6	7	459	53	23	6
80 (1)	8	5	373	72	17	4
85 (1)	4	7	159	46	17	5
90 (1)	5	7	112	24	13	3
95 (1)	7	7	130	21	13	4
100 (1)	1	2	107	33	13	4

Fonte: Autor.

Não foi possível utilizar o dispositivo 4 para a tomada de dados utilizando a fonte de Cs-137, pois ele foi adicionado ao trabalho após a conclusão dessa etapa.

Na figura 9 é possível visualizar como foi realizado o posicionamento dos dispositivos em relação à fonte de Cs-137.

Também foi verificado o comportamento do DPM, que pode ser vista no gráfico 6. Foi realizado um ajuste linear para cada dispositivo utilizando a equação y = a x + b, os valores dos parâmetros podem ser vistos na tabela 5.

Tabela 5 - Valores obtidos pela regressão linear do DPM para a fonte de Cs-137.

Dispositivo	a (cm^{-1})	b	R^2 (%)
1	0,011 (3)	0,4 (2)	87,84
2	0,0022 (4)	0,0 (3)	86,02
3	0,0030 (6)	0,03 (4)	89,08

Fonte: Autor.

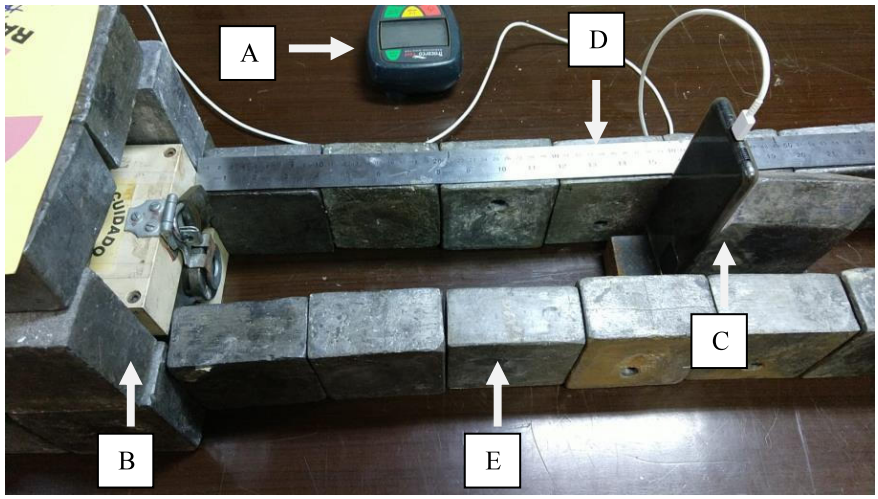
Por fim foi realizado uma comparação da ER dos sensores 1 e 2 em relação ao 3 conforme indicado no gráfico 7. Os pontos do dispositivo 2 que se encontraram na região de saturação foram ignorados na análise. Foi realizado um ajuste linear para cada dispositivo utilizando a equação y = a x + b, os valores dos parâmetros seguem indicados na tabela 6.

Tabela 6 - Valores dos coeficientes lineares para a eficiência relativa para a fonte de Cs-137.

Dispositivo	a (cm^{-1})	b	R^2 (%)
1	0,0005 (1)	0,003 (2)	46,90
2	-0,09 (2)	17 (1)	54,60

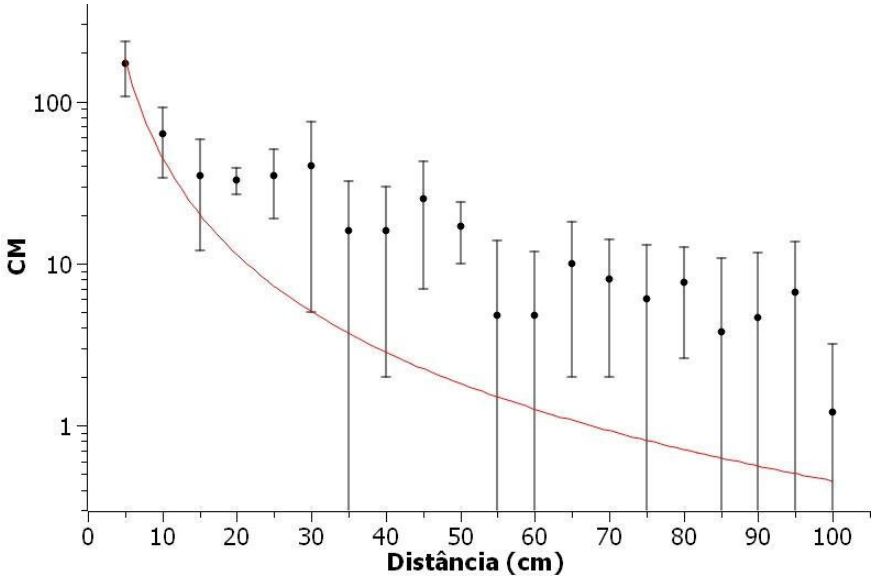
Fonte: Autor.

Figura 9 - Dispositivo 2 sendo irradiado pela fonte de Cs-137.



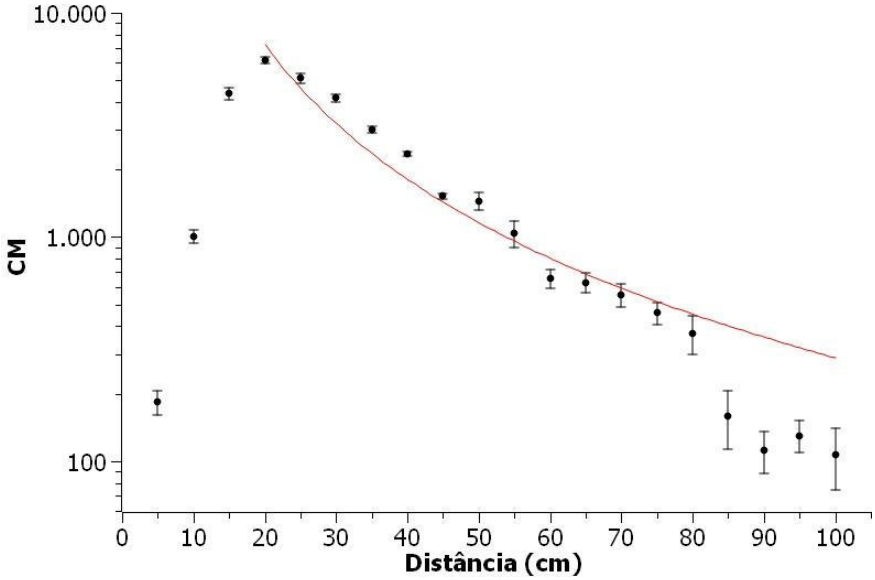
Fonte: Autor. (A) Contador Geiger-Müller calibrado para taxa de dose. (B) Fonte de Cs-137. (C) DC 2. (D) Régua. (E) Blindagem de chumbo.

Gráfico 3 - Dados obtidos para a fonte de Cs-137 utilizando o DC 1.



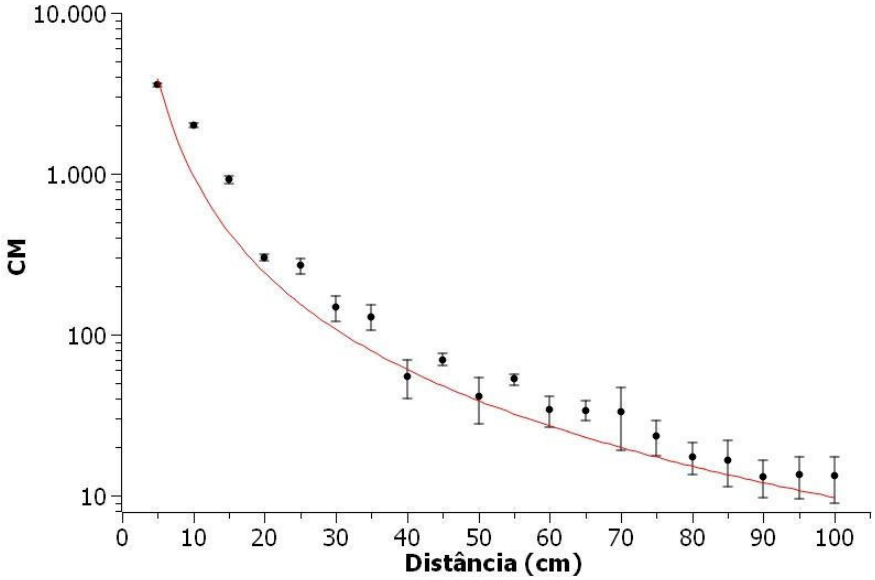
Fonte: Autor.

Gráfico 4 - Dados obtidos para a fonte de Cs-137 utilizando o DC 2.



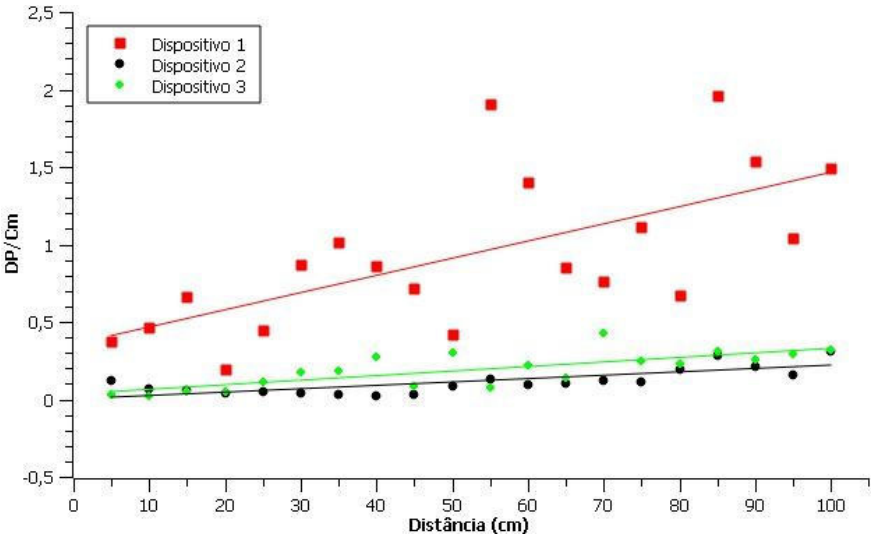
Fonte: Autor.

Gráfico 5 - Dados obtidos para a fonte de Cs-137 utilizando o DC 3.



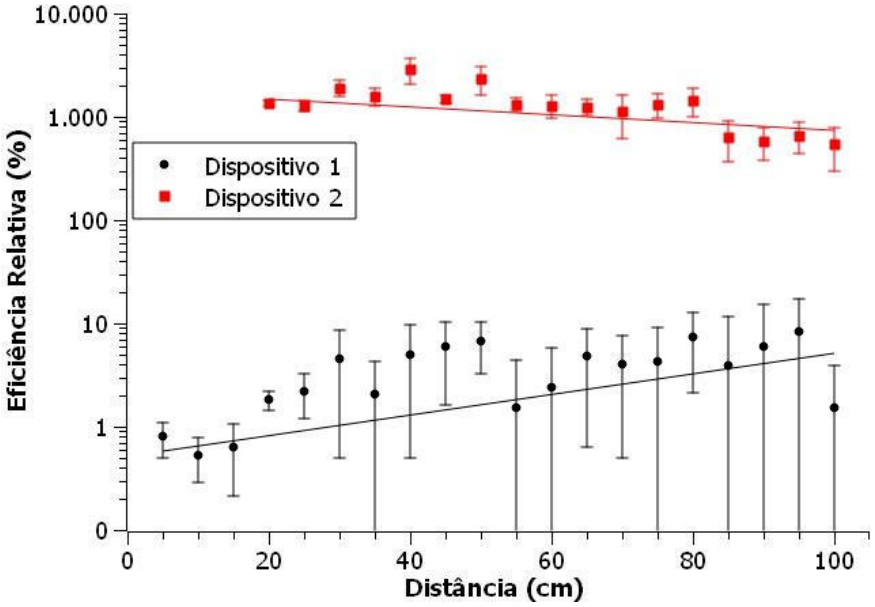
Fonte: Autor.

Gráfico 6 - Desvio padrão relativo obtido para a fonte de Cs-137.



Fonte: Autor.

Gráfico 7 - Eficiência relativa dos dispositivos 1 e 2 em comparação com 3.



Fonte: Autor.

Todos os dispositivos apresentaram um dos comportamentos esperados, com o número de contagens diminuindo com o aumento da distância. Entretando o dispositivo 2 apresentou um comportamento anômalo entre 5 e 20 cm, indiciando que nessas distâncias o CIS encontrou-se saturado.

Ao analisar os DPM de cada dispositivo, verificou-se um comportamento levemente dependente com a distância para os dispositivos 2 e 3 quando comparados com o dispositivo 1, que apresentou um coeficiente angular de 0,011(3) cm^{-1}, o que resultou em uma incerteza de medição que cresceu significativamente junto com a distância, chegando a ultrapassar o número de contagens medidos.

A análise da ER mostrou que o dispositivo 2 possui o sensor mais eficiente entre os três dispositivos, tendo produzido cerca de 10 vezes mais contagens que o sensor 3, e 1000 vezes que o sensor 1 em um mesmo ponto.

5.2 Fonte de Am-241

Utilizando a fonte de Cs-137 foram repetidas as tomadas de dados realizada com a fonte de Cs-137. Os valores obtidos podem ser vistos na tabela 7, e nos gráficos 8, 9, 10 e 11 em que foram aplicados um ajuste não linear utilizando a equação $y = a / (x^2)$.

Nas figuras 10 e 11 é possível visualizar a execução do experimento.

Tabela 7 - Valores medidos para a fonte de Am-241.

Dispositivo	1		2		3		4	
S-F (cm)	Cm	DP	Cm	DP	Cm	DP	Cm	DP
5 (1)	14506	300	51224	457	10114	255	105401	2603
10 (1)	4602	75	15432	465	3499	78	31910	1129
15 (1)	2458	121	8346	132	1499	95	16239	712
20 (1)	1416	82	4995	187	896	21	8915	388
25 (1)	809	49	3126	157	631	63	6254	290
30 (1)	628	50	2417	129	431	20	4137	158
35 (1)	410	47	1638	68	340	14	3107	175
40 (1)	322	37	1283	99	260	31	2448	132
45 (1)	295	54	1131	43	216	29	1976	266
50 (1)	158	32	863	78	183	25	1636	114
55 (1)	154	36	700	46	149	14	1371	135
60 (1)	119	24	653	66	127	17	1150	116
65 (1)	109	24	486	14	122	24	962	100
70 (1)	104	15	493	49	101	23	722	129
75 (1)	110	22	385	32	89	15	686	92
80 (1)	64	14	348	23	83	11	693	66
85 (1)	62	30	338	6	71	17	543	81
90 (1)	76	26	287	71	65	12	473	93
95 (1)	48	11	223	64	59	14	449	89
100 (1)	36	5	232	26	52	15	416	59

Fonte: Autor.

Novamente foi verificado o comportamento do desvio padrão relativo à média (DPM), conforme apresentado no gráfico 12. Foi realizado um ajuste linear para cada dispositivo utilizando a equação y = a x + b, os valores dos parâmetros podem ser vistos na tabela 8.

Novamente foi realizado uma comparação da eficiência de detecção relativa dos sensores 1, 2 e 4 em relação ao 3 que pode ser vista no gráfico 13. Foi realizado um ajuste linear para cada dispositivo utilizando a equação y = a x + b, os valores dos parâmetros podem ser vistos na tabela 9.

Tabela 8- Valores obtidos pela regressão linear de DPM para a fonte de Am-241.

Dispositivo	a (cm^{-1})	b	R^2 (%)
1	0,0029 (6)	0,01 (4)	86,93
2	0,0016 (4)	0,00 (3)	73,39
3	0,0024 (3)	0,01 (2)	95,65
4	0,0017 (2)	0,01 (1)	94,62

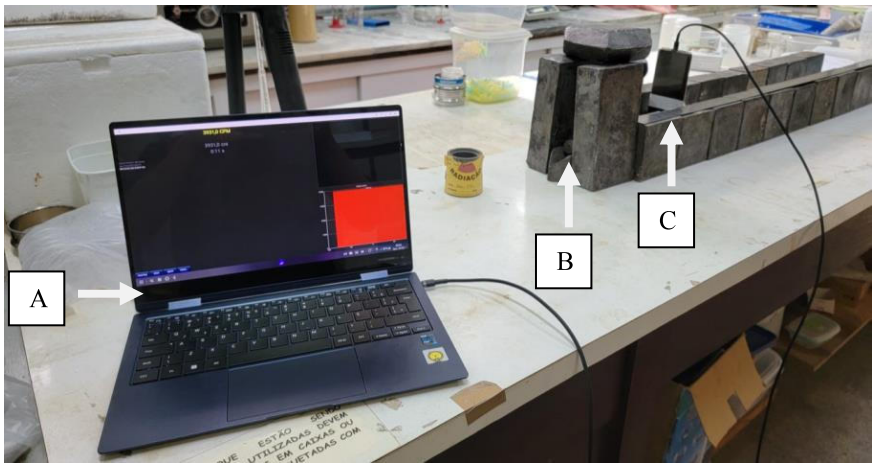
Fonte: Autor.

Tabela 9 - Valores dos coeficientes lineares para a eficiência relativa para a fonte de Am-241.

Dispositivo	a (cm^{-1})	b	R^2 (%)
1	-0,001 (1)	0,245 (5)	59,16
2	-0,006 (6)	7,4 (2)	3,26
4	-0,007 (2)	2,97 (8)	51,76

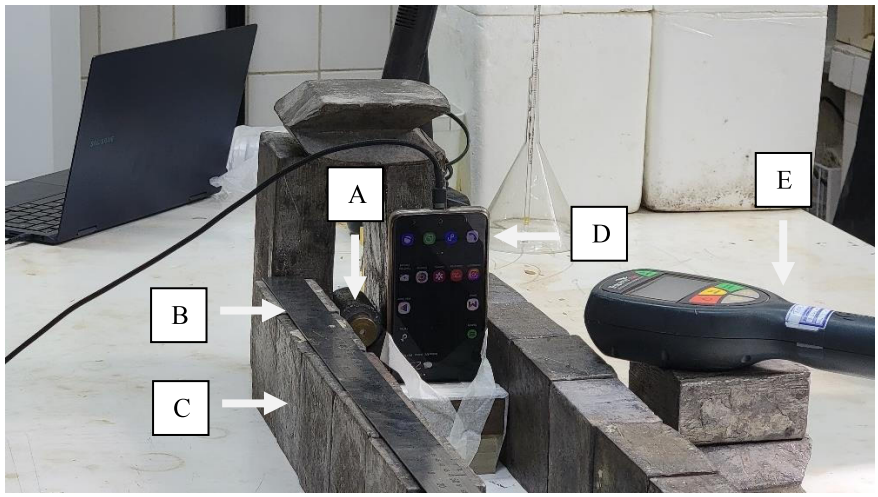
Fonte: Autor.

Figura 10 - Montagem experimental utilizando a fonte de Am-241.



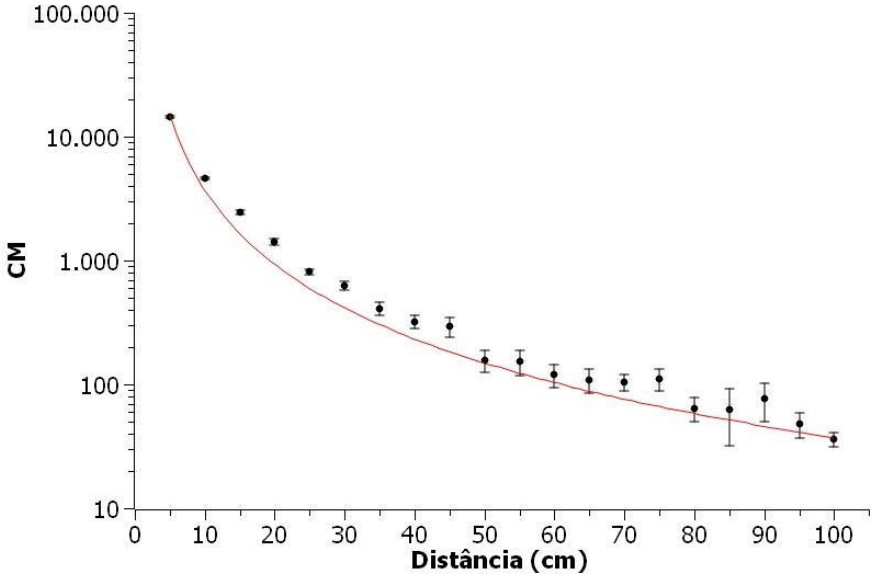
Fonte: Autor. (A) Computador exibindo a tela do RadioactivityCounter. (B) Fonte de Am-241. (C) DC 2.

Figura 11 - Posicionamento do dispositivo 2 em relação a fonte de Am-241.



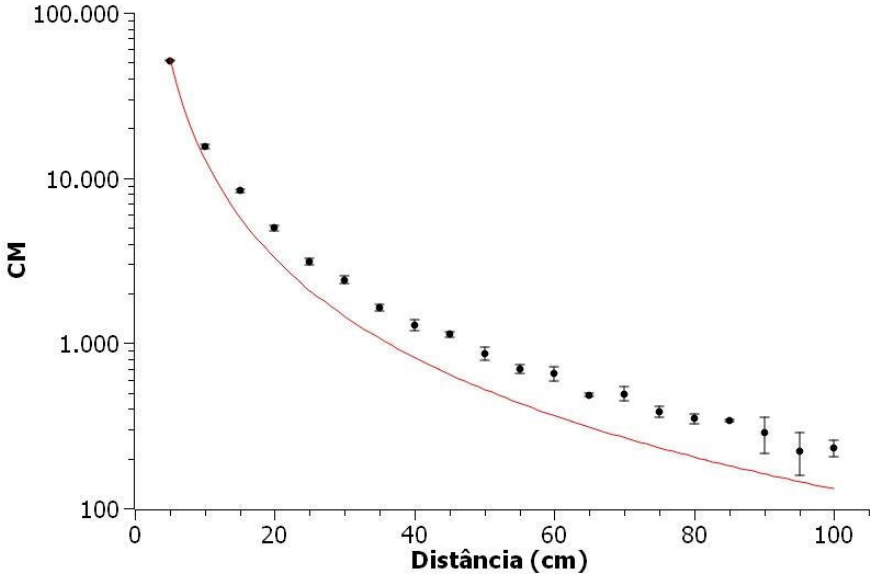
Fonte: Autor. (A) Fonte de Am-241. (B) Régua. (C) Blindagem de chumbo. (D) DC 2. (E) contador Geiger-Müller calibrado para taxa de dose.

Gráfico 8 - Dados obtidos para a fonte de Am-241 utilizando o DC 1.



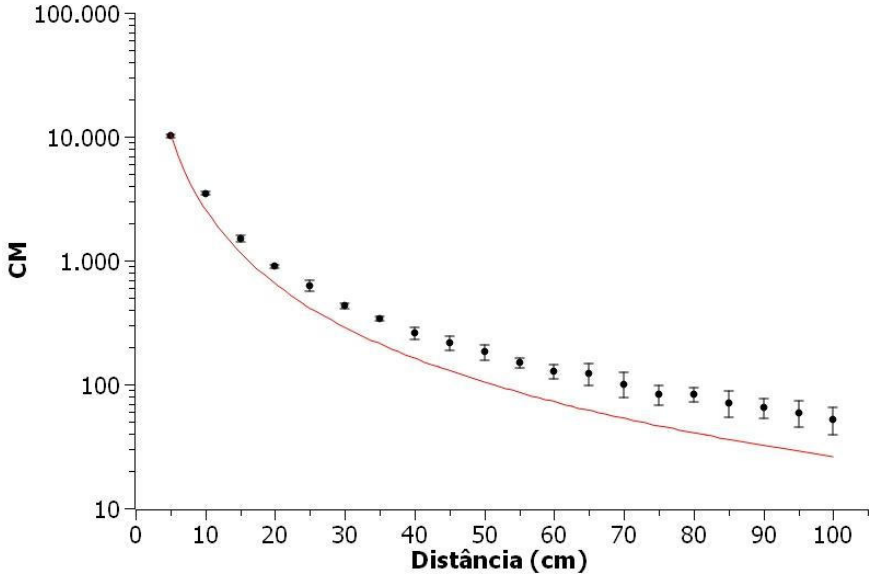
Fonte: Autor.

Gráfico 9 - Dados obtidos para a fonte de Am-241 utilizando o DC 2.



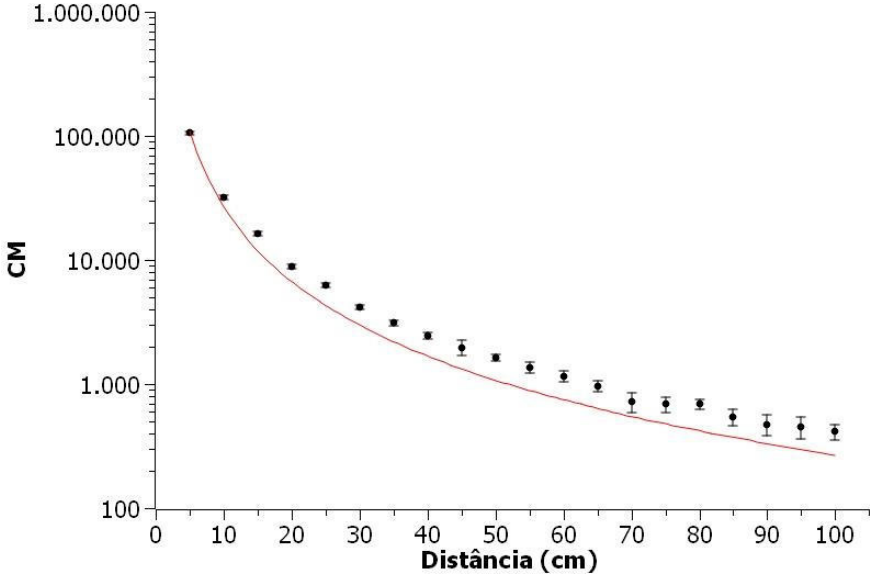
Fonte: Autor.

Gráfico 10 - Dados obtidos para a fonte de Am-241 utilizando o DC 3.



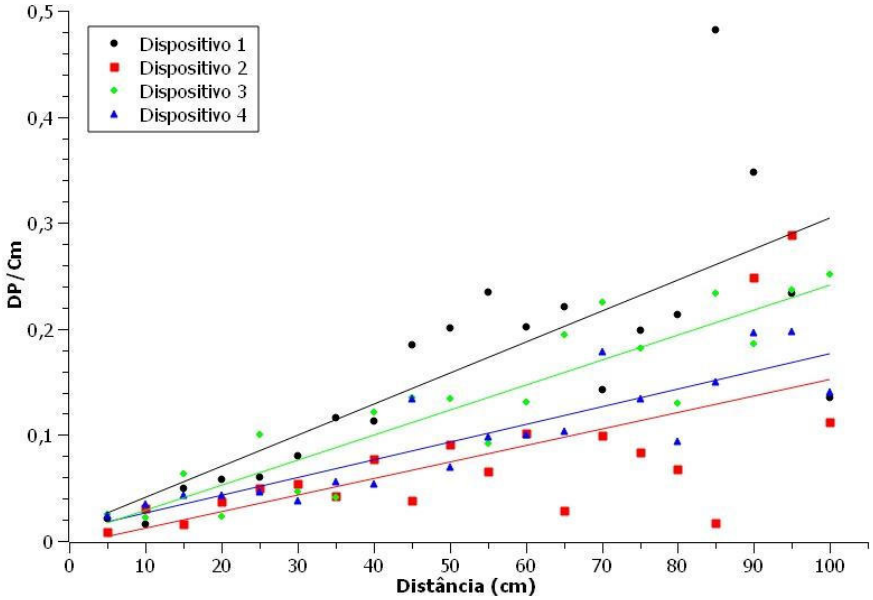
Fonte: Autor.

Gráfico 11 - Dados obtidos para a fonte de Am-241 utilizando o DC 4.



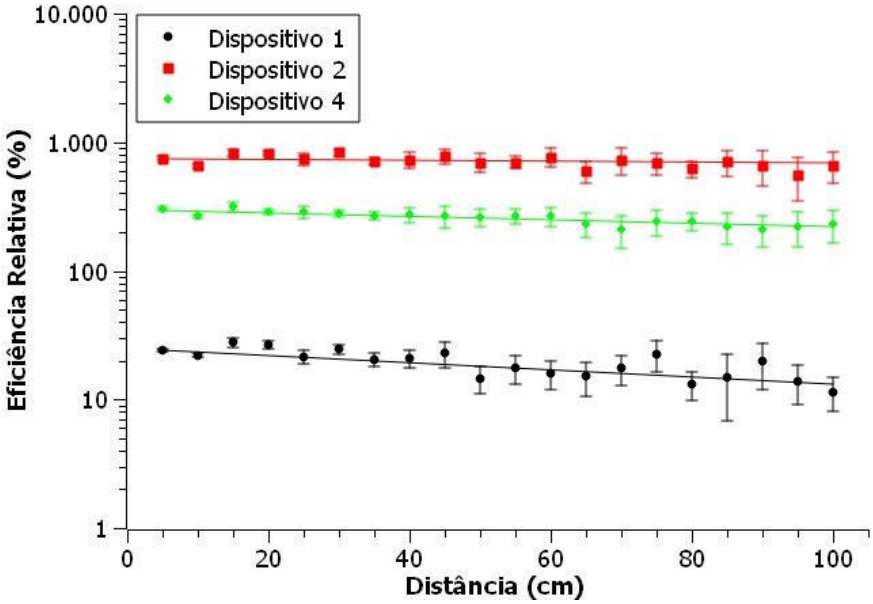
Fonte: Autor.

Gráfico 12 - Desvio padrão relativo obtido para a fonte de Am-241.



Fonte: Autor.

Gráfico 13 - Eficiência relativa dos dispositivos 1, 2 e 4 em comparação com 3.



Fonte: Autor.

Foi possível verificar que o número de contagens variou de acordo com S-F, além disso, nenhum dispositivo apresentou uma região de saturação em nenhum intervalo.

A partir dos dados obtidos, os dispositivos 2 e 4 apresentam contagens relativas mais coerentes entre si, indicando serem os mais precisos, isto pode ser verificado a partir dos resultados obtidos, com seus ajustes lineares resultando em retas muito próximas. Por outro lado, os dispositivos 1 e 3 foram relativamento menos precisos.

Os dispositivos 2 e 4 demonstraram uma eficiência absoluta maior que o sensor 3, com o último dispositivo sendo aproximadamente 7 vezes mais eficiente. O sensor 1 foi o menos eficiente entre todos.

5.3 Comparativo entre fontes.

Foi calculado a precisão relativa entre as fontes de Am-241 e Cs-137 para os dispositivos 1, 2 e 3. Os valores calculados encontram-se na tabela 10.

Tabela 10 - Valores de precisão relativa obtidos para cada DC

Dispositivo	PR (%)
1	370,19
2	224,91
3	255,93

Fonte: Autor

Todos os dispositivos mostraram serem mais precisos para a fonte de Am-241, o que pode ser explicado pela eficiência de detecção ser inversamente proporcional com a energia do fóton incidente, com a fonte de Cs-137 sendo cerca de 11 vezes mais energético que o da fonte de Am-241.

6 Conclusões e sugestões

Esse trabalho foi bem-sucedido em mostrar que os CIS são capazes de detectar radiação gama e funcionar como um detector contador, tendo sido mostrado que há relação entre o número de contagens obtidas, com a quantidade de radiação incidente.

Os resultados para o experimento utilizando a fonte Cs-137 se mostraram se irregulares quando comparados com os da fonte de Am-241, isso pode ter ocorrido pela quantidade de dados obtidos por posicionamento ser baixo, com um período de cinco minutos, enquanto Hoey *et al.* (2015) sugeriram pelo menos dez minutos. Esse comportamento foi mais bem visto no dispositivo 1.

Como sugestão para trabalhos futuros, sugere-se a investigação do uso do aplicativo RadioactivityCounter, ou algum outro similar, em situações de acidentes radiológicos e nucleares, sendo realizado simulações de acidentes já ocorridos. Além disso, a produção de material didático para o uso correto do aplicativo por pessoas em geral, e a verificação se seu uso oferece vantagem para a população em casos de acidentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

· Panorama do Uso de TI no Brasil – 2022. FGV, 2022, Disponível em: https://portal.fgv.br/artigos/panorama-uso-ti-brasil-2022. Acesso em: 10/03/2023.

· STEFANOV, K. D. CMOS Image Sensors. Bristol, UK: IOP Publishing, 2022.

· GUERRINI, N. C. Design of CMOS detectors for electrons and X-rays. Apresentação de slides. Disponível em: https://indico.cern.ch/event/774201/contributions/3463471/. Acesso em 20/03/2023

· International Atomic Energy Agency. The Fukushima Daiichi Accident. Vienna, AT: IAEA Publishing, 2015.

· ISHIGAKI, Y *et al*. Development of Mobile Radiation Monitoring System Utilizing Smartphone and Its Field Tests in Fukushima. IEE Sensors Journal, 2013.

· ISHIGAKI, Y *et al.* Participatory radiation information monitoring with SNS after Fukushima. In: ISCRAM , n°12, 2015, Kristiansand. ISCRAM 2015 Conference Proceedings - 12th International Conference on Information Systems for Crisis Response and Management. Kristiansand: Information Systems for Crisis Response and Management, ISCRAM, 2015.

· HOEY, O. V. *et al.* RADIATION DOSIMETRY PROPERTIES OF SMARTPHONE CMOS SENSORS. Radiation protection dosimetry, v. 168, n. 3, p. 1-8 , 2015.

· KANG, H. G. *et al*. An investigation of medical radiation detection using CMOS image sensors in smartphones. Nuclear instruments & methods in physics research. Section A, Accelerators, spectrometers, detectors and associated equipment, v. 823, p. 126–134, 2016.

· WEI, Q.-Y. *et al*. Surveying ionizing radiations in real time using a smartphone. Nuclear science and techniques, v. 28, n. 5, 2017.

· MAFODDA, A.; WODA, C. External dose-rate measurements based on smartphone CMOS sensors. Radiation measurements, v. 137, n. 106403, p. 106403, 2020.

· ATTIX, F. H. Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry. Weinheim: Wiley-VCH, 2004.

· OKUNO, E.; YOSHIMURA, E. Física das Radiações. 1 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

· KOLL, G. F. Radiationn Detection and Measurement. 3 ed. Hoboken: Wiley, 1999.

· EISBERG, R., RESNICK, R. Física Quântica. Rio de Janeiro, Campus, 1979

· TEUBNER, U. BRÜCKNER, H. J. Optical Imaging and Photography. 1 ed. Germany: De Gruyter, 2019

· BLAHNIK, V.; SCHINDELBECK, O. Smartphone imaging technology and its applications. Advanced optical technologies, v. 10, n. 3, p. 145–232, 2021.

· OHTA, J. *Smart CMOS Sensors and Applications*. 2 ed. Boca Raton, Fl: CRC Press, 2022