UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

CAMPUS RECIFE

RODOLPHO LAYME FALCÃO NETO

DESENVOLVIMENTO DE UM DOSÍMETRO PORTÁTIL DE LEITURA DIRETA EM TEMPO REAL PARA USO EM RADIOLOGIA

RECIFE

2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

CAMPUS RECIFE

ENGENHARIA DE ENERGIA

RODOLPHO LAYME FALCÃO NETO

DESENVOLVIMENTO DE UM DOSÍMETRO PORTÁTIL DE LEITURA DIRETA EM TEMPO REAL PARA USO EM RADIOLOGIA

TCC apresentado ao Curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal de Pernambuco, Campus Recife, como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Orientador(a): Viviane Khoury Asfora
Coorientador(a): Charles Nilton do Prado Oliveira

RECIFE

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Falcão Neto, Rodolpho Layme.
Desenvolvimento de um dosímetro portátil de leitura direta em tempo real para uso em radiologia / Rodolpho Layme Falcão Neto. - Recife, 2023.
78 p. : il., tab.

Orientador(a): Viviane Khoury Asfora
Cooorientador(a): Charles Nilton do Prado Oliveira
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia de Energia - Bacharelado, 2023.
Inclui referências, anexos.

1. Dosimetria. 2. Radioproteção. 3. Detectores fotodiodos. 4. Detectores de radiação. 5. Sistemas de monitoramento. I. Asfora, Viviane Khoury. (Orientação). II. Oliveira, Charles Nilton do Prado. (Coorientação). IV. Título.

620 CDD (22.ed.)

Universidade Federal de Pernambuco
Centro de Tecnologia e Geociências
Departamento de Energia Nuclear

Curso de Graduação: **Engenharia de Energia**	**Disciplina:** **EN248 Projeto de Graduação (TCC)** **Responsável pela Disciplina:** **Prof. Alexandre Costa** **Período:** **2023.1** **Local e Data:** **Recife, 28 de setembro de 2023**

Monografia

Título: DESENVOLVIMENTO DE UM DOSÍMETRO PORTÁTIL DE LEITURA DIRETA EM TEMPO REAL PARA USO EM RADIOLOGIA

gov.br Documento assinado digitalmente
RODOLPHO LAYME FALCAO NETO
Data: 05/10/2023 15:55:43-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Aluno: Rodolpho Layme Falcão Neto; Matrícula: 114.213.854-22

gov.br Documento assinado digitalmente
VIVIANE KHOURY ASFORA
Data: 05/10/2023 16:42:57-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Orientador: Viviane Khoury Asfora, Departamento de Energia Nuclear, Centro de Tecnologia e Geociência, Universidade Federal de Pernambuco

gov.br Documento assinado digitalmente
CHARLES NILTON DO PRADO OLIVEIRA
Data: 05/10/2023 22:18:11-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Coorientador: Charles Nilton do Prado Oliveira, Departamento de Energia Nuclear, Centro de Tecnologia e Geociência, Universidade Federal de Pernambuco

RESUMO

O presente estudo se dedicou ao desenvolvimento de um dosímetro portátil, de baixo custo de produção, com o intuito de medir a dose para monitoração ocupacional. O equipamento faz uso de detectores semicondutores, previamente caracterizados no Laboratório de Metrologia das Radiações Ionizantes, consolidando assim, uma trajetória de pesquisa contínua. O dosímetro desenvolvido se distingue ao transmitir seus dados via conexão Wi-fi, possibilitando uma operação autônoma e virtualmente ilimitada em termos de alcance, contanto que o aparelho mantenha uma conexão estável à internet. Para avaliar seu desempenho foram utilizadas as qualidades de radioproteção definidas pela ISO 4037, mais especificamente a N40, N60, N80, N100, N120 e N150. Os resultados, nos ensaios de reprodutibilidade e repetibilidade, atestam a consistência e confiabilidade do dosímetro. Quanto à linearidade e dependência angular, os achados mostram-se promissores, indicando uma excelente conformidade com os padrões desejados. Todavia, no que concerne a dependência energética, apesar dos resultados demonstrarem a viabilidade do emprego de filtros de cobre para mitigação dessa dependência, o dosímetro se mostrou aquém dos padrões praticados comercialmente. Assim, essa faceta do dispositivo requer um maior desenvolvimento para se adequar aos padrões encontrados em dosímetros comerciais.

Palavras-chave: Dosimetria; Radioproteção; Detectores fotodiodos; Detectores de radiação; Sistemas de monitoramento.

ABSTRACT

The present study focused on the development of a low-cost portable dosimeter for the purpose of measuring occupational exposure. The device utilizes semiconductor detectors, previously characterized in the Laboratory of Ionizing Radiation Metrology, thus consolidating a trajectory of continuous research. The developed dosimeter stands out by transmitting its data via Wi-Fi connection, enabling autonomous and virtually unlimited operation in terms of range, as long as the device maintains a stable internet connection. To evaluate its performance, the radiation protection qualities defined by ISO 4037 were used, specifically N40, N60, N80, N100, N120, and N150. The results in reproducibility and repeatability tests confirm the consistency and reliability of the dosimeter. Regarding linearity and angular dependence, the findings are promising, indicating excellent conformity with desired standards. However, concerning energy dependence, despite the results demonstrating the feasibility of using copper filters to mitigate this dependence, the dosimeter fell short of commercially practiced standards. Thus, this aspect of the device requires further development to align with the standards found in commercial dosimeters.

Keywords: Dosimetry; Radiation protection; Photodiode detectors; Radiation detectors; Monitoring systems

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO 9

2 CONCEITOS PRELIMINARES 10

2.1 Grandezas Dosimétricas e Operacionais 10

2.2 Operação de Detectores Semicondutores 11

2.3 Características da Operação de Fotodiodos como Sensor 16

2.3.1 Dependência Energética 16

2.3.2 Dependência Angular 17

2.3.3 Danos Causados por Radiação 17

2.3.3 Sensibilidade Térmica 17

2.3.3 Efeitos dos Atributos Físicos 18

3 REVISÃO DE LITERATURA E ENUNCIADO DO PROBLEMA 19

3.1 Uso de transdutores semicondutores em dosímetros 19

3.1.1 Dosímetros comerciais 20

3.1.2 Dosímetros Experimentais 23

3.2 Caracterização dos Sensores 26

3.3 Análise Crítica 30

3.4 Objetivo 31

3.4.1 Objetivo Geral 31

3.4.2 Objetivos Específicos 31

4 METODOLOGIA 33

4.1 Escolha do Sensor 33

4.2 Desenvolvimento do Dosímetro 34

4.2.1 Desenvolvimento do circuito de amplificação 35

4.2.2 Desenvolvimento do Circuito de Leitura e Transmissão de Dados 36

4.2.3 Teste de Comunicação Entre os Circuitos 36

4.2.4 Testes da Comunicação Sem Fio 37

4.3 Caracterização do Dosímetro 37

4.3.2.1 Dependência Energética 39

4.3.2.2 Análise do Desempenho de Filtros 40

4.3.2.3 Linearidade 41

4.3.2.5 Dependência Angular 42

4.3.2.6 Repetibilidade e Reprodutibilidade 43

5 ESTUDO DE CASO 44

5.1 Desenvolvimento da Eletrônica 44

5.1.1 Modo de operação padrão com cabo 46

5.1.2 Modo de operação diferencial com cabo 56

5.1.3 Modo de operação padrão sem cabo 57

5.2 Caracterização Dosímetro 61

5.2.1 Teste de Dependência Energética 64

5.2.2 Desempenho dos Filtros 67

5.2.3 Linearidade 69

5.2.4 Dependência angular 70

5.2.5 Repetibilidade e Reprodutibilidade 71

6 CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS FUTURAS 72

REFERÊNCIAS 76

ANEXO A – ESQUEMA DO CIRCUITO UTILIZADO NO MODO DE OPERAÇÃO PADRÃO COM USO DE CABO BIAXIAL 78

1. INTRODUÇÃO

Nos tempos modernos, as radiações ionizantes desempenham um papel fundamental em várias esferas da atividade humana, desde aplicações médicas e industriais até investigações científicas. No entanto, a exposição a elevadas doses de radiação pode provocar sérios danos à saúde dos indivíduos. Por isso há a necessidade imperativa de garantir a segurança e a proteção daqueles que interagem com elas. Nesse contexto, a proteção radiológica emerge como um importante conceito para mitigar os riscos associados à essa exposição. Um elemento essencial para avaliar essa exposição é o dosímetro, um dispositivo projetado para medir e monitorar a quantidade de radiação absorvida por um indivíduo ou ambiente.

Este trabalho se concentra no desenvolvimento de um dosímetro, no qual um fotodiodo atua como o principal sensor de radiação. Dando continuidade aos trabalhos elaborados no Laboratório de Metrologia das Radiações Ionizantes. A combinação de avanços na tecnologia de detecção com a necessidade premente de dosimetria eficaz impulsiona esse esforço de pesquisa.

Além disso, não há produção nacional de um dosímetro de baixo custo. Com a crescente demanda por instrumentação acessível e confiável, a capacidade de fabricar tais dispositivos internamente pode contribuir significativamente para melhorar a vigilância radiológica. A convergência de avanços tecnológicos e a busca por soluções mais econômicas impulsiona a pesquisa sendo desenvolvida.

Ao longo deste trabalho, serão abordados diversos aspectos, desde os princípios básicos de detecção de radiação até a construção prática do dosímetro com o fotodiodo como sensor central. Procurando entregar um protótipo que esteja de acordo com as normas vigentes assim como competitivo com as opções disponíveis no mercado.

2 CONCEITOS PRELIMINARES

2.1 Grandezas Dosimétricas e Operacionais

As radiações ionizantes são assim ditas quando são capazes de arrancar um elétron de um átomo ou de uma molécula, ao qual ele está ligado. Podem ser classificadas como diretamente ionizantes, no caso são as partículas carregadas, como elétron, pósitron, prótons, partículas alfas; ou ainda indiretamente ionizante que corresponde aos fótons e nêutrons. Qualquer aplicação que faça uso das radiações ionizantes depende essencialmente de um detector de radiação, que realize a sua monitoração de maneira apropriada. De forma geral, definimos detectores de radiação como equipamentos que são capazes de registrar a interação da radiação em um sinal que possa ser mensurado. O importante é que o sinal medido tenha uma relação simples e unívoca com alguma grandeza relacionada à radiação que o produziu. A seguir serão apresentadas as principais grandezas dosimétricas e operacionais que permitem quantificar os efeitos das radiações ionizantes.

As grandezas referentes ao campo de radiação estão relacionadas ao número de radiações com outras grandezas do sistema tradicional, como tempo ou área, assim obtendo grandezas como atividade, cuja unidade é o bequerel, e fluência, medida em nº de partículas/m^2s. Outra maneira é analisar os efeitos da interação da radiação com a matéria, relacionando esses efeitos com grandezas como a massa ou volume temos grandezas dosimétricas como Exposição, Kerma e Dose absorvida. Existem também as grandezas limitantes, que indicam o risco à saúde humana oriundo da exposição à radiação ionizante, exemplificadas pela dose equivalente e dose efetiva, ambas medidas em Siverts (Sv). A dose equivalente corresponde a dose absorvida multiplicada por um fator que leva em consideração a qualidade da radiação, proveniente dos valores da eficácia biológica relativa. A dose efetiva leva em consideração não apenas a qualidade do tipo de radiação incidente, mas também os órgãos ou tecidos do corpo humano que foram expostos. Isso ocorre porque diferentes tipos de radiação têm efeitos biológicos diferentes e afetam órgãos e tecidos de maneira distinta. Por fim, as grandezas operacionais, são usadas na proteção radiológica, como por exemplo na monitoração individual, já que as grandezas limitantes são de difícil estimativa e não são mesuráveis. Alguns exemplos de grandezas operacionais são as equivalentes de dose ambiente e pessoal.

Existem duas principais instituições internacionais responsáveis pela definição e recomendações dessas grandezas de proteção radiológica e as relações entre si e suas unidades. São elas a *International Comission on Radiation Units and Measurements*, ICRU, responsável pelas definições das grandezas básicas e operacionais, e a *International Comission on Radiological Protection*, ICRP, responsável pelas recomendações das grandezas limitantes.

2.2 Operação de Detectores Semicondutores

Os semicondutores são materiais geralmente formados por silício ou germânio desempenham um papel central na revolução tecnológica do século XX. O que difere os semicondutores de materiais isolantes é o arranjo de suas bandas de energia. Podemos discernir três distintas estruturas das bandas de energia, a banda de valência, a banda de condução e o espaçamento entre bandas, conhecido como a banda proibida. A banda de valência, a banda de energia mais baixa, abriga elétrons que estão fortemente ligados à estrutura do material, enquanto a banda de condução, de energia mais alta, permite que os elétrons tenham maior mobilidade, tornando-se praticamente livres para se deslocar. Entre essas bandas existe uma faixa de energia da qual os elétrons não conseguem ocupar estados, essa é a banda proibida.

A largura dessa banda proibida está intrinsicamente associada ao tipo de material. Em ambos, materiais semicondutores e isolantes, os estados de energia adjacentes à extremidade superior da banda de valência não podem ser ocupados, delimitando, assim, a banda proibida. Para que os elétrons se desloquem para a banda de condução, e assim se tornem livres, é necessário que sejam providos da diferença de energia entre esses estados, diferença essa ditada pela magnitude da banda proibida. Em materiais isolantes a largura da banda proibida é maior que 5 eV, enquanto nos semicondutores ela geralmente é menor que 2 eV.

Quando um semicondutor é exposto à radiação eletromagnética, incluindo radiações ionizantes, ou à radiação térmica, os elétrons presentes no material são excitados e adquirem energia suficiente para então migrar para a banda de condução. Essa migração resulta em um estado vazio na banda de valência, gerando “lacunas”, que podem ser interpretados como partículas carregadas positivamente. Estas “lacunas” se tornam entidades móveis, suscetíveis à influência de campos elétricos, consequentemente, deslocando-se sob sua ação.

Os semicondutores comerciais passam por processo sofisticado conhecido como dopagem, cujo propósito é facilitar a mobilidade dos elétrons entre as bandas. Nessa técnica são adicionadas impurezas estrategicamente ao material, criando semicondutores de Tipo n ou de Tipo p. O que irá ditar o tipo do semicondutor é a natureza da impureza adicionada. No caso dos semicondutores de Tipo n são incorporadas impurezas conhecidas como doadoras, como o fósforo. Quando essas impurezas são inseridas, os átomos que a constituem irão ocupar espaços na estrutura cristalina, previamente ocupados pelo material original, estabelecendo ligações covalentes. No entanto, dada a natureza doadora dessas impurezas, haverá um excedente de elétrons. Esses elétrons possuem uma fraca ligação eletroestática ao átomo de impureza, ocupando uma posição na banda proibida muito próxima da banda de condução. Essa proximidade facilita a migração desses elétrons para banda de condução.

Por outro lado, os semicondutores de Tipo p contêm impurezas receptoras, como o boro, gerando uma ausência de elétrons. A brecha resultante dessa ausência é preenchida por elétrons, que passam a ocupar uma posição na banda proibida próxima à banda de valência. Esse processo acaba criando uma lacuna na banda de valência. Esses materiais semicondutores constituem os detectores semicondutores e podem ser configurados em junções P-N ou PIN. Essas configurações desempenham um papel fundamental em várias aplicações, incluindo a detecção de radiações ionizantes.

Os detectores P-N são formados pela junção de um semicondutor de tipo n e um semicondutor de tipo p, criando assim uma zona de depleção nessa junção, onde as cargas são coletadas de maneira rápida e eficiente, sendo ela o volume sensível do detector. Uma esquemática de um semicondutor P-N está exemplificada na Figura 1. Quando exposto a radiações ionizantes, esse dispositivo gera pares elétron-lacuna, os quais, por sua vez, são então direcionados pelo campo elétrico que surge na zona de depleção. Este processo culmina na produção de uma corrente elétrica, com magnitude diretamente proporcional à quantidade de radiação incidente. Uma característica dessa configuração é sua capacidade de expansão da zona de depleção ao ser aplicada uma polarização reversa. Tal procedimento consiste na aplicação de uma tensão negativa no lado de tipo p e positiva no de tipo n, acarretando na expansão do volume sensível do detector, consequentemente, aumentando a sensibilidade na detecção de radiações ionizantes.

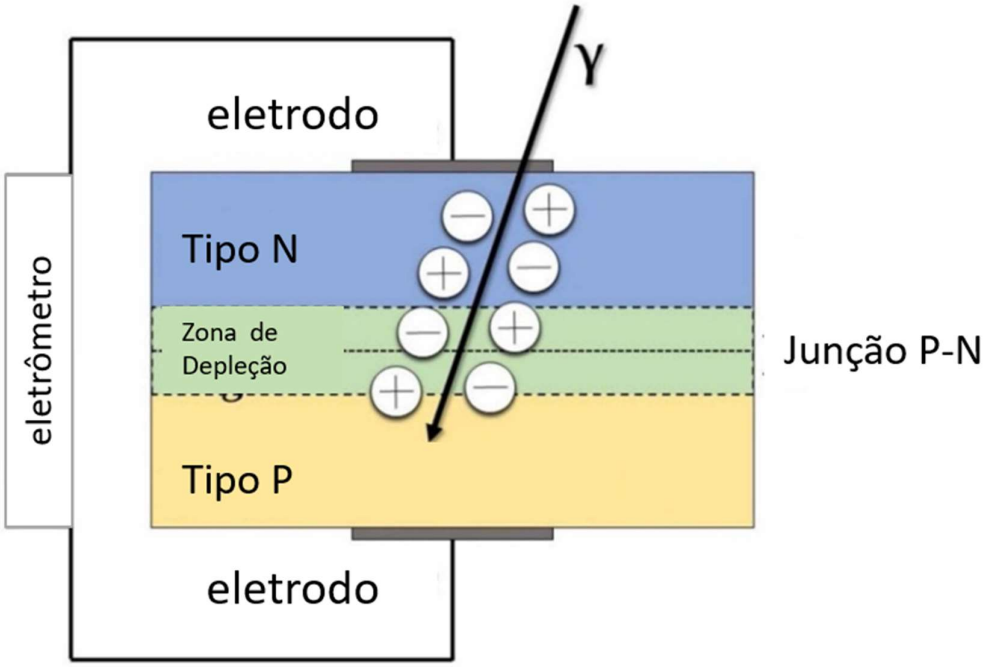


Figura 1 – Modelo de um semicondutor P-N (Adaptado de Rosenfeld et al. (2020)).

A configuração do tipo PIN, por sua vez, de maneira semelhante à P-N, é constituída por uma junção entre semicondutores de tipo n e tipo p. No entanto, essa configuração é distinguida, por uma região intrínseca I, entre as regiões n e p. Essa camada intrínseca é criada pela deposição de íons, aumentando a eficiência na conversão de radiação ionizante em pares de portadores de carga. Vale destacar que essa camada intrínseca assume o papel de uma zona de depleção expandida, cujo aumento ocasionará em uma maior absorção dos fótons incidentes. O incremento dessa camada intrínseca se traduz em um aprimoramento na sensibilidade do detector à radiação, assim, sendo muitas vezes utilizado em aplicações que requerem uma alta eficiência na detecção.

Para viabilizar a operação desses detectores semicondutores em dosímetros, é necessário o uso de equipamentos que registrem a corrente induzida pela exposição à radiação ionizante nesses semicondutores. A Figura 2 demonstra como semicondutores podem ser empregados como sensores, habilitados tanto para detecção de partículas quando para o monitoramento das doses de radiação. Quando a radiação ionizante interage com o semicondutor na sua zona de depleção, são criadas cargas, prontamente coletadas e amplificadas para detecção. No modo de

medição de partículas, a corrente resultante, caso passe de um valor pré-estabelecido, é convertida em pulsos, ativando o contador digital, que irá contar cada pulso gerado. No outro modo, a quantificação da dose de radiação, a corrente ou tensão transitória gerada na saída do amplificador é medida por um circuito, composto por um conversor analógico para digital (ADC) e um microcontrolador. Esta medida é submetida a uma integração temporal, provendo, assim, uma estimativa da energia depositada pela radiação ionizante (KARMAKAR et al., 2021).

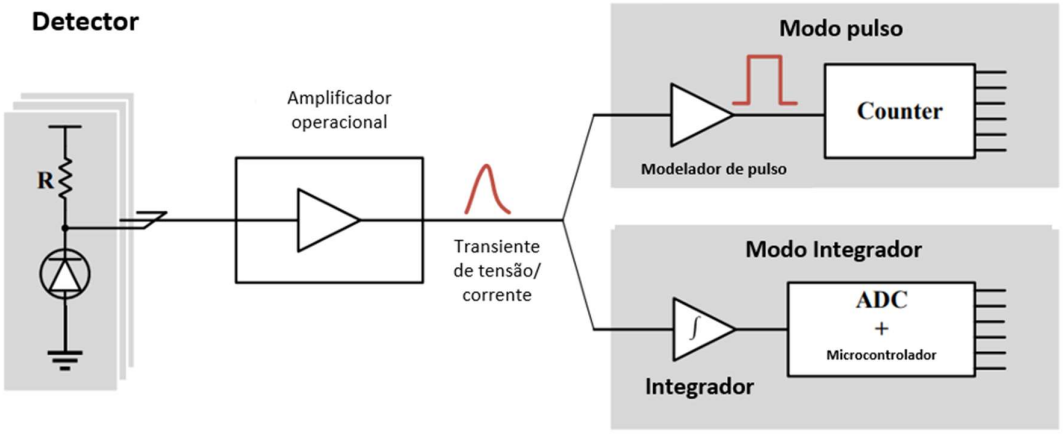


Figura 2 – Diferentes modos de operação de um detector de radiação cujo sensor é um semicondutor. (Adaptado de Karmakar et al. (2021)).

Para ambas modalidades de funcionamento, pulso e corrente, podemos conectar o semicondutor fotodiodo de duas maneiras distintas: no modo fotovoltaico e no modo de fotocondutividade.

No modo fotovoltaico, não é aplicada uma diferença de potencial na junção do diodo, resultando em seu funcionamento como uma fonte de corrente. Nesse cenário, a resposta do dispositivo é linear e proporcional à intensidade da radiação ionizante incidente. Um esquema dessa conexão pode ser observado na Figura 3.

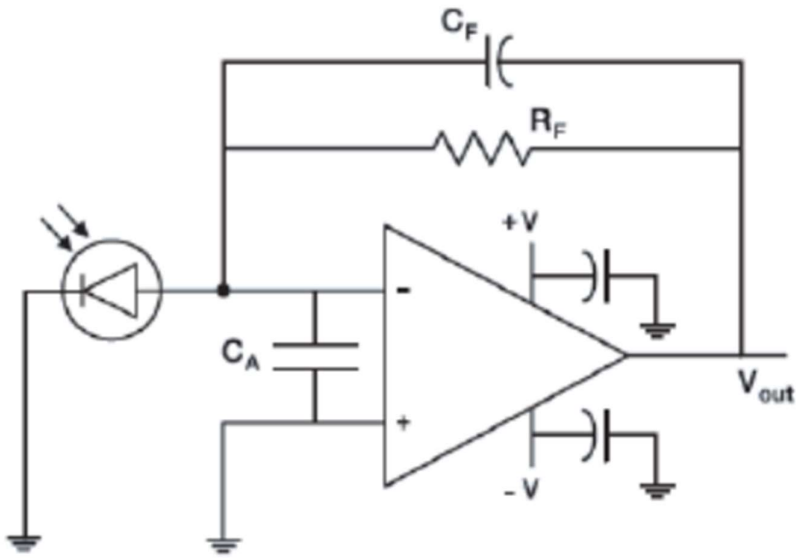


Figura 3 – Esquema de ligação do detector no modo fotovoltaico (fonte: Oliveira (2015)).

Já no contexto da fotocondutividade, uma tensão reversa é aplicada na junção P-N, ampliando sua zona de depleção. Para tensões baixas a coleta dos pares de carga pode ser menos eficiente, diminuindo a amplitude do pulso. Este efeito pode ser substancialmente mitigado, através do aumento do campo elétrico, até a região de saturação, onde a amplitude do pulso se mantém constante, independentemente do valor da tensão. Na Figura 4 está esquematizado o modo fotocondutividade.

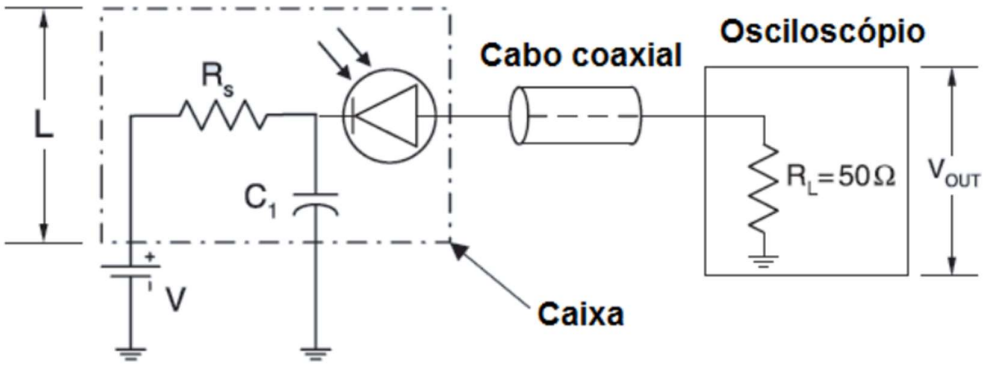


Figura 4 – Esquema de ligação do detector no modo fotocondutividade (fonte: Oliveira (2015)).

2.3 Características da Operação de Fotodiodos como Sensor

A utilização de fotodiodos como elementos sensíveis em dosímetros apresenta certas características que devem ser discutidas. Esta seção, se dedica a uma exploração de uma variedade de efeitos intrínsecos a essa configuração sensível. A compreensão desses efeitos é importante não só para decifrar suas implicações, mas também identificar estratégias eficazes para mitigar suas consequências. Desde os desafios associados às dependências, energética e angular, até os danos causados pela radiação e a sensibilidade térmica.

2.3.1 Dependência Energética

A resposta do diodo irá variar dependendo da energia da radiação à qual está sendo exposto. Esta dependência pode ser explicada pela forma como a radiação interage com o sensor. Para energias inferiores a 50 keV, o efeito fotoelétrico predomina. Neste processo a energia transportada pelas ondas eletromagnéticas é completamente absorvida por um elétron residente no material, ejetando-o da superfície do sensor. O resultado desse evento é a formação de pares elétron-lacuna detectados pelo circuito de leitura. Já para energias acima de 50 keV o efeito predominante é o espalhamento Compton. Nesse cenário parte da energia da radiação é absorvida por um elétron, induzindo vibrações no átomo que culminam na geração de pares elétron-lacuna. Embora esse processo também seja detectado pelo ciruito, o sinal resultante é substancialmente menos intenso quando comparado ao observado no efeito fotoelétrico (OLIVEIRA, 2015).

A sensibilidade dos fotodiodos às alterações na energia média das radiações incidentes pode ser amenizada com o uso de filtros, especialmente de materiais com elevado número atômico. Os filtros se mostram particularmente eficaz na redução das respostas para radiações de baixa energia (ROSENFELD, 2020). Em estudos realizados por Silva (1992) e Costa Filho (2021), corroboram a eficácia desses filtros. Silva (1992) empregou filtros de alumínio, enquanto Costa Filho (2021) de cobre, com bons resultados na mitigação da dependência energética.

2.3.2 Dependência Angular

A resposta do fotodiodo à radiação ionizante é influenciada pelo ângulo de incidência da mesma. Para ângulos de incidência tangencial o detector irá ter uma resposta menor que para ângulos de incidência normal. Esse efeito pode ser explicado pela geometria da região sensível do fotodiodo, que é plana e rodeada por áreas não sensíveis de diferentes espessuras, interferindo na geração da resposta a ser detectada. Essa dependência pode ser controlada com melhorias no design do invólucro utilizado para abrigar o fotodiodo, ou até mesmo explorando o uso de dois ou mais fotodiodos (ROSENFELD, 2020).

2.3.3 Danos Causados por Radiação

A interação da radiação com o fotodiodo pode desencadear a formação de defeitos na sua estrutura cristalina, modificando as características do mesmo. Essas mudanças não se manifestam de maneira linear; em vez disso, podem causar uma perda na sensibilidade do sensor seguindo um padrão não uniforme. No entanto para que se note uma perda significativa é necessário que o semicondutor seja exposto a uma considerável dose de radiação. Esta constatação é corroborada por Melo (1988), cujo estudo registrou uma variação na resposta do fotodiodo SFH206 apenas após expô-lo à uma considerável dose de até 8 kGy.

Uma possível solução, como evidenciada pelo estudo de Bueno (2019), envolve a pré-irradiação desses sensores, resultando na estabilização de sua resposta. Após uma certa quantidade de dose acumulada a variação na resposta cessa, culminando em leituras subsequentes que permanecem estáveis e confiáveis.

2.3.3 Sensibilidade Térmica

A sensibilidade do fotodiodo demonstra uma variabilidade em função da temperatura. A magnitude dessa oscilação na sensibilidade varia, se mantendo entre 0,05 e 0,5% por grau Celsius, para temperaturas entre 10º C e 35º C. Este fenômeno merece destaque devido ao tempo necessário para que o fotodiodo alcance um estado de equilíbrio térmico com a temperatura da pele do usuário, que pode se estender até 5 minutos (ROSENFELD, 2020).

Outro efeito observado nos fotodiodos é que também exibem uma corrente intrínseca na ausência da radiação ionizante. Essa corrente é conhecida como corrente de fuga, e ela possui duas componentes, uma flui através da superfície e outra no volume do detector. A magnitude da corrente de fuga será diretamente proporcional ao espaçamento entre as bandas. A temperatura também irá influenciar positivamente a intensidade dessa corrente, pois, como explicado anteriormente, uma das maneiras de se excitar um elétron para que ele transite para a banda de condução é a energia térmica.

2.3.3 Efeitos dos Atributos Físicos

Tanto o nível e tipo de dopagem assim como seu volume irão interferir nas medidas a serem realizadas pelo fotodiodo. No que concerne à dopagem, o seu tipo irá afetar o comportamento do detector, influenciando a mobilidade dos portadores de carga, ao passo que o nível de dopagem irá afetar negativamente a sensibilidade. Um baixo nível de dopagem se traduz na redução da quantidade de armadilhas no cristal, aumentando o tempo de vida dos portadores de carga, consequentemente, aumentando a sensibilidade. Em relação ao volume, em fotodiodos de dimensões reduzidas o ruído estático tende a aumentar, devido à relação direta desse fenômeno e o tamanho da região de depleção. Assim, se faz necessário um tempo de medida mais alongado para alcançar o grau de exatidão desejado, em fotodiodos menores.

3 REVISÃO DE LITERATURA E ENUNCIADO DO PROBLEMA

3.1 Uso de transdutores semicondutores em dosímetros

Em geral podemos dizer que os detectores de radiação são transdutores, pois convertem a energia da radiação em um sinal eu poder ser medido ou avaliado. Os transdutores semicondutores são amplamente utilizados em aplicações de dosimetria, como em radioterapia, medicina nuclear e proteção radiológica. O uso dos semicondutores apresenta algumas vantagens na elaboração de dosímetros, já que possuem dimensões compactas, sendo caracterizados por sua discreta e reduzida forma física, enquanto possuem alta sensibilidade. Possuem também baixo custo e peso, possuindo boa resolução em baixas faixas de preço. De forma complementar, também realizam medidas diretas, onde o sinal de saída é elétrico (KHOURY et al., 2007; OLIVEIRA et al., 2016).

Os transdutores semicondutores são amplamente utilizados em aplicações de dosimetria, como em radioterapia, medicina nuclear e proteção radiológica. O uso dos semicondutores apresenta algumas vantagens na elaboração de dosímetros, já que possuem dimensões compactas, sendo caracterizados por sua discreta e reduzida forma física, enquanto possuem alta sensibilidade. Possuem também baixo custo e peso, possuindo boa resolução em baixas faixas de preço. De forma complementar, também realizam medidas diretas, onde o sinal de saída é elétrico (KHOURY et al., 2007; OLIVEIRA et al., 2016).

Devido às suas vantagens diversos dosímetros comerciais podem ser encontrados no mercado, com diferentes modos de operação e características. Ademais, com os avanços na tecnologia de semicondutores há também um grande interesse da comunidade científica em estudar e desenvolver dosímetros mais avançados e de baixo custo. Abaixo são abordados alguns dos dosímetros, que utilizam semicondutores como elemento sensível, em comercialização, assim como novos equipamentos sendo desenvolvidos e analisados pela academia.

3.1.1 Dosímetros comerciais

Alguns dosímetros comerciais fazem o uso de semicondutores como seu detector, como por exemplo o Rad-60/62, da marca Rados, e o PM1300, da Polimaster, apresentados respectivamente nas Figuras 5 e 6.

Figura 5 – Dosímetro Rad-60/62 com detector semicondutor

Figura 6 – Dosímetro PM1300 com detector semicondutor

Na Tabela 1, são listadas algumas características desses aparelhos, retiradas de seus Datasheets, listando apenas as características de interesse para o tema abordado.

Tabela 1 – Características do RM 60/62 e do PM1300

Especificações	RM 60/62	PM1300
Intervalo de dose equivalente	1 µSv a 9,99 Sv	1 µSv a 20 Sv
Intervalo de taxa de dose equivalente	1 µSv/h a 9,99 Sv/h	1 µSv/h a 10 Sv/h
Tolerância	± 5%	±15%
Intervalo de Energia	60 keV a 6 MeV	15 keV a 20 MeV
Dimensões	78 x 67 x 22 mm	85 x 56 x 20 mm
Peso	80 g	84 g
Comunicação	Infravermelho (comunicação com o leitor ADR-1 vendido pela mesma empresa, em combinação com software para computador Mirion)	USB e Rádio

Alguns outros dosímetros comerciais que operam de maneira semelhante ao dosímetro proposto, são o RaySafe i3, da RaySafe, retratado na Figura 7, e o DoseAware, da Philips, exposto na Figura 8. Ambos fornecem informação em tempo real da dose medida para cada usuário, podendo uma estação central acompanhar mais de um usuário do equipamento.

Figura 7– Dosímetro RaySafe i3 da RaySafe com detector semicondutor.

Figura 8 – Dosímetro DoseAware da Philips com detector semicondutor.

Assim como os dosímetros citados anteriormente segue a Tabela 2 com as características, retiradas de seus respectivos datasheets, do i3 e do DoseAware:

Tabela 2 – Características do DoseAware e do RaySafe i3

Especificações	**DoseAware**	**RaySafe i3**
Intervalo de dose equivalente	1 μSv a 10 Sv	1 μSv a 10 Sv
Dependência energética	< 25% (para N40 a N150)	< 25% (para N40 a N150)
Tolerância	± 5%	-
Intervalo de Energia	60 keV a 6 MeV	15 keV a 20 MeV
Dimensões	-	40 x 58 x 17 mm
Peso	34 g	84 g
Comunicação	Rádio com a estação central	Rádio com a estação central

Esses dosímetros são recomendados para uso em salas cirúrgicas, já que o RaySafe i3 possue uma distância efetiva de comunicação de apenas 15 metros com a estação central. Isso dificulta o monitoramento dos funcionários no decorrer de suas atividades, fazendo com que seja necessário a proximidade à uma estação que se comunique pela internet, possibilitando que os dados coletados sejam enviados para armazenamento e análise em tempo real.

Em estudo realizado por Krzanovic *et al.* (2021), foram realizados uma série de testes em dosímetros comerciais utilizados na radiologia intervencionista. O escopo

dessa pesquisa estava direcionado à exploração do desempenho dos dosímetros em qualidades de Raios-X atípicas, fora dos parâmetros usualmente adotados. Isso permitiu a investigação de potenciais incertezas relacionadas à medição das doses de radiação.

Além de dosímetros termoluminescentes, a pesquisa estendeu seus testes a dosímetros que empregam o uso de semicondutores como elemento sensível, sendo eles o MPD, o R100B, o Black Piranha, todos fabricados pela RTI Eletronics e o Unfors Xi R/F Classic da RaySafe. Os resultados abrangem uma análise da performance destes dosímetros em três diferentes parâmetros, dependência angular, dependência energética e dependência da taxa de dose.Os resultados foram normalizados em relação à qualidade RQR8. Os dosímetros testados no estudo apresentaram excelente desempenho em termos dedependência energética e linearidade.

No que diz respeito à dependência angular, foram realizadas medidas para duas qualidades, a RQR8, normalmente mais utilizada, e a Veridic3 80AlCu, menos comum, com resultados semelhantes para ambas. Os detectores R100B e Unfors Xi apresentaram baixa dependência angular, enquanto o Piranha e o MPD, que possuem múltiplos elementos detectores, apresentaram uma resposta que decrescia rapidamente com o aumento no ângulo.

A análise da resposta em relação à taxa de dose também foi conduzida nas mesmas duas qualidades utilizadas no teste da dependência angular, com a corrente de tubo variando entre 3 e 25 mA. As respostas foram normalizadas para um valor de taxa de dose correspondente a uma corrente de tubo de 9 mA. Todos os dosímetros mantiveram uma resposta relativa entre 0.99 e 1.01, para ambas as qualidades RQR8 e Veridic3 80AlCu, valores notáveis, principalmente considerando que a incerteza das medidas de 1%. Corroborando a validade e confiabilidade dos semicondutores como sensores na dosimetria.

3.1.2 Dosímetros Experimentais

Existem, na literatura, alguns exemplos de dosímetros semelhantes ao dispositivo proposto neste estudo. Entre eles está o Pocket Dose, demonstrado na Figura 9, desenvolvido por Fujibuchi et al. (2019). O dosímetro emprega o uso de dois fotodiodos como sensores em seu detector, o S6755 e o S2506, para, respectivamente, baixas e altas taxas de dose. O detector é então conectado por um

cabo a um transmissor sem fio, que opera via Bluetooth 4.0, permitindo o envio de dados em tempo real.

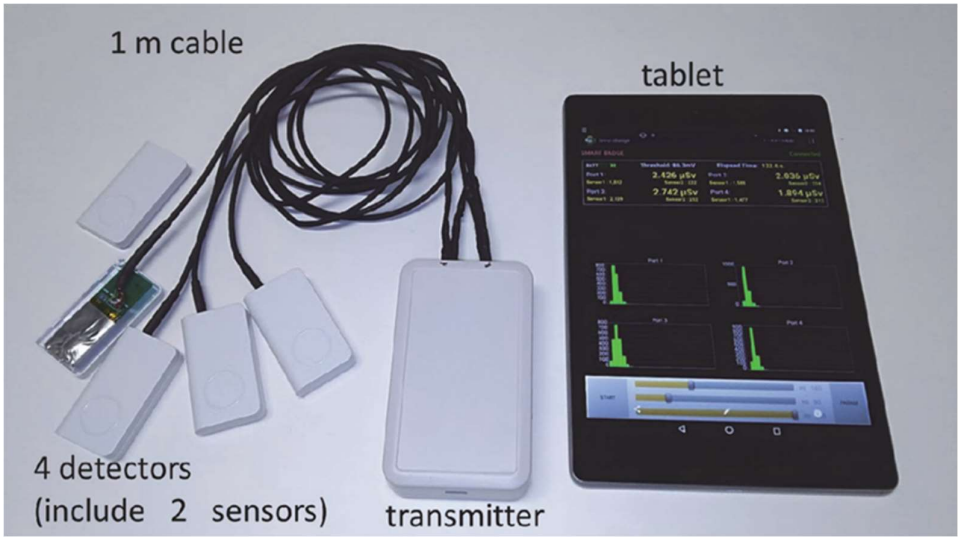


Figura 9 – Foto do Pocket Dose, empregando o uso de mais de um detector conectados ao transmissor, responsável pela comunicação com o tablet (fonte: Fujibuchi et al. (2019)).

O transmissor pode ser conectado a múltiplos detectores, constituído por dois sensores cada, podendo realizar medidas simultâneas de mais de uma parte do corpo. Os dados obtidos são então dispostos em uma interface em um tablet. Esse dispositivo não somente viabiliza a coleta instantânea de dados, como também simplifica o processo de arquivamento, permitindo que os dados sejam armazenados com facilidade e até mesmo encaminhados por e-mail para fins de catalogação e análise posterior.

Outro dosímetro em desenvolvimento, que também emprega o uso de semicondutores como elemento sensível, foi apresentado em estudo realizado por Yamaguchi et al. (2021). Fazendo uso de um fotodiodo S1087-01, fabricado pela Hamamatsu, o amplificador operacional LMC662, da Texas Instruments, e um ADC. O dosímetro foi configurar como um monitor de taxa de dose, e sua resposta foi analisada. Para essa finalidade, o dispositivo foi exposto à radiação ionizante proveniente de uma unidade geradora de Raio-X, e o sinal gerado foi então transmitido para um computador por meio de uma conexão USB. A estrutura do circuito empregado para a amplificação desses sinais está ilustrada na Figura 10.

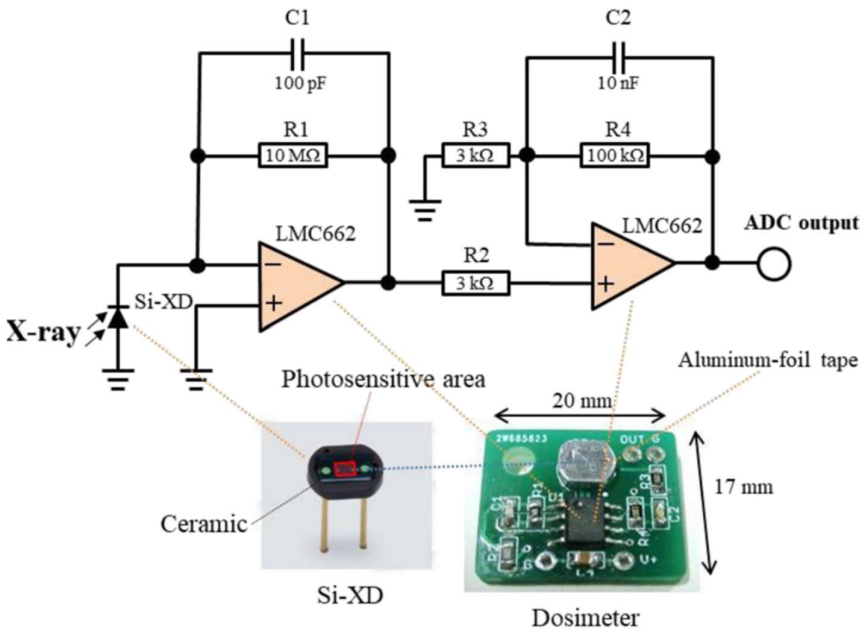


Figura 10 – Circuito do eletrômetro desenvolvido (fonte: Yamaguchi et al. (2019)).

Os resultados apresentados foram promissores, porém com algumas ressalvas. Como esperado a tensão de saída demonstrou uma correlação positiva tanto com a tensão como a corrente de tubo. Para uma tensão de tubo constante de 100 kV as taxas de doses mesuradas foram proporcionais à corrente do tubo, as taxas calibradas foram equivalentes às observadas no dosímetro comercial, as quais serviram como parâmetro de comparação. No entanto, como esperado de um sensor semicondutor, a dependência energética foi acima do nível praticado comercialmente, manifestando uma sensibilidade exacerbada para baixas energias médias. Fazendo-se necessária a aplicação de medidas que sanem essa dependência no desenvolvimento do aparelho, como por exemplo, o uso de filtros.

Atestando a possibilidade do desenvolvimento de equipamentos mais simples e de baixo custo, Nakajima *et al*. (2021) estudou o comportamento de um dosímetro artesanal concebido para aplicações em mamografia. Esse dosímetro de baixo custo foi apresentado em um seminário organizado pela *Japanese Society of Radiological Technology*.

O equipamento investigado possui um detector e display conectados por um cabo coaxial de 10 metros, com design compacto e leve, facilitando seu

armazenamento, manipulação e transporte. O fotodiodo S2386-8K, foi empregado como sensor, sabendo das limitações desse tipo de transdutor quanto à dependência energética. Como estratégia para mitigar tais limitações o equipamento possui um seletor integrado ao display, que possibilita a correção necessária para assegurar uma resposta precisa. Todavia, devido à sua simplicidade, essa configuração requer ajustes manuais e possui apenas quatro configurações para diferentes tensões de tubo entre 28 e 32 kV.

Para avaliar seu desempenho, o dosímetro foi exposto a diferentes condições, variando tanto a tensão de tubo quanto as especificações dos filtros e alvos, enquanto era medido o kerma no ar. Os resultados obtidos foram então comparados com as leituras realizadas pela câmara de ionização 10X6-6M:Radcal e o eletrômetro EMF520R: EMF Japan.

Foi observado que, sob as condições adequadas, ou seja, quando se utilizavam filtros e alvos de molibdênio o equipamento desenvolvido apresentou variações abaixo do valor de 5% em comparação com a câmara ionizante. No entanto, essa precisão pode deteriorar-se caso se opte por diferentes configurações de filtro, alvo ou tensão de tubo. Não obstante, é possível calcular um fator de correção que permite ajustar a resposta do dosímetro às diferentes condições, corroborando sua eficácia na medição do kerma no ar a um custo acessível e com simples manufatura.

3.2 Caracterização dos Sensores

Existem diversos fotodiodos em comercialização no mercado, oferecendo uma gama variada de características e especificações. Por isso, se faz necessário a realização de estudos no intuito de caracterizá-los. Possibilitando, assim, uma escolha consciente do equipamento que melhor atenda às necessidades do dosímetro sendo desenvolvido. Em estudo realizado por Costa Filho (2021), foram caracterizados dois detectores fotodiodos para uso em dosimetria, o UV035D e o UV100DC da Optoeletronics. Os sensores fotodiodos objetos do estudo podem ser vistos na Figura 11, assim como suas características elucidadas na Tabela 3.

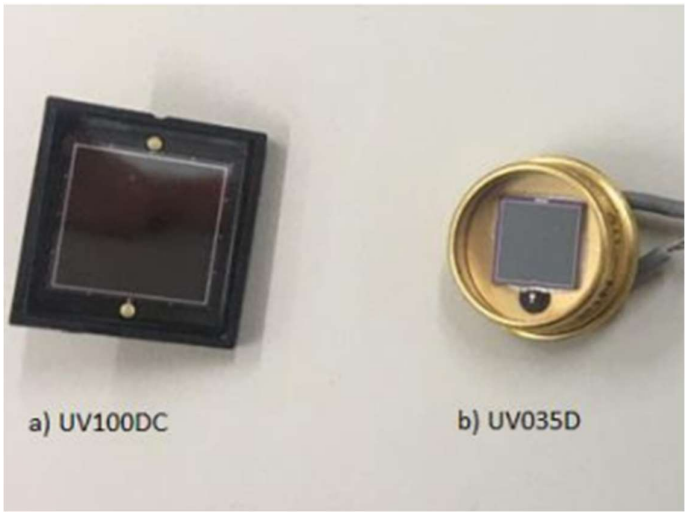


Figura 11 – Fotodiodos a) UV100DC e b) UV035D da Optoeletronices (fonte: Costa Filho (2021)).

Tabela 3 – Características elétricas dos fotodiodos UV035D e UV100DC (fonte: Costa Filho (2021)).

Características	**UV100DC**	**UV035D**
Espectro de sensibilidade	200 - 1100 nm	200 - 1100 nm
Área de sensibilidade	100 mm2	35 mm2
Tensão reversa	5 V	5 V
Capacitância	1750 pF	550 pF

Vale ressaltar que o UV100DC se destaca com uma área de sensibilidade quase três vezes maior em comparação ao UV035D. Naturalmente, espera-se que o UV100DC apresente também uma resposta proporcionalmente quando irradiado. As equações de reta, assim como os coeficientes de correlação de Pearson (R^2), derivados das linhas de tendência obtidas a partir das respostas dos fotodiodos a diferentes qualidades de radioproteção testadas e à energia do Cs^{137}, são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Coeficiente angular de cada reta obtidos por Costa Filho (2021) (fonte: Costa Filho (2021)).

Qualidades (ISO N)	UV100DC	UV035D
N30	y = 218,19x R^2=0,9546	y = 1,91x R^2=0,9922
N40	y = 192,64x R^2=0,9955	y = 6,19x R^2=0,9948
N60	y = 175,37x R^2=0,9913	y = 14,89x R^2=0,993
N80	y = 97,61x R^2=0,9942	y = 20,84x R^2=0,999
N100	y = 71,26x R^2=0,9942	y = 20,85x R^2=0,9988
N150	y = 50,74x R^2=0,9613	y = 17,40x R^2=0,9949
Césio 137	y = 23,63x R^2=0,9989	y = 7,71x R^2=0,9989

Como antecipado, o UV100DC apresentou respostas que superaram em pelo menos três vezes as obtidas com o UV035D, corroborando para o seu uso como sensor em aplicações para baixas taxas de dose. Ambos apresentaram coeficientes de correlação de Pearson acima de 0,95, indicando uma excelente linearidade em suas respostas.

Quanto a dependência energética, foram analisadas as repostas de ambos fotodiodos sob as mesmas condições, sem uso de filtros. Para isso os valores dos coeficientes angulares das retas demonstradas na Tabela 4, foram normalizados pelo valor do coeficiente da energia do Cs^{137}. No intuito de mitigar a dependência energética observada foi avaliado a aplicação de filtros, compostos por lâminas de cobre de 0,09 mm de espessura, sobrepostas em camadas incrementais. As qualidades de radioproteção usadas para o teste foram as ISO N30; N60; N80 e N100. As Figuras 12 e 13 exibem os resultados para respectivamente o UV100DC e o UV035D com um filtro de 0,54 mm de espessura, equivalente a seis camadas.

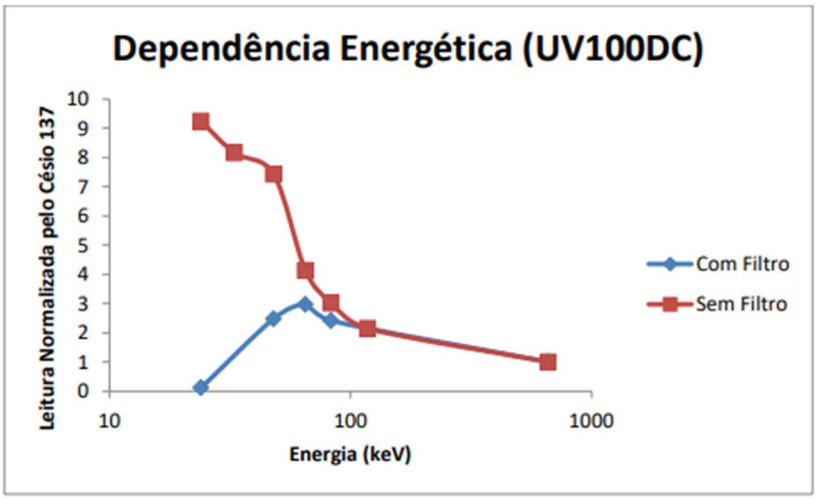


Figura 12 – Comparação da dependência energética antes e após o uso de filtro para o fotodiodo UV100DC (fonte: Costa Filho (2021)).

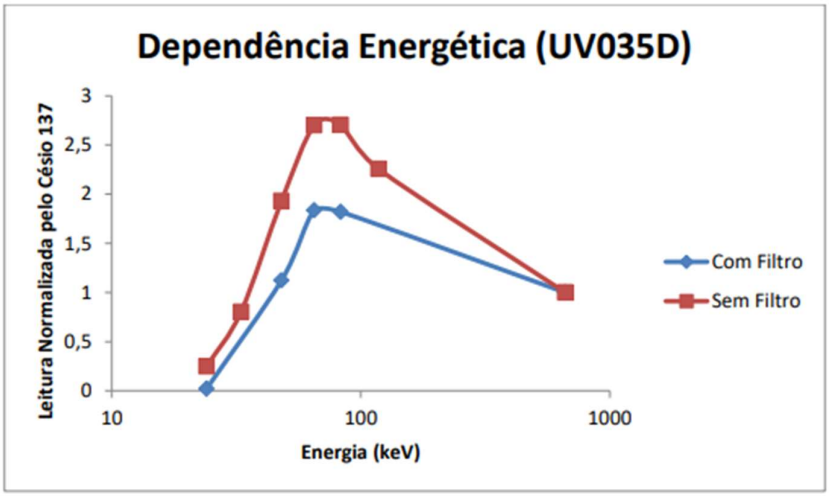


Figura 13 – Comparação da dependência energética antes e após o uso de filtro para o fotodiodo UV035D (fonte: Costa Filho (2021)).

Ao analisar as Figuras o desempenho do UV100DC se sobressai com o uso de filtros. Os gráficos ilustram a convergência das leituras após a implementação desses dispositivos. Para as qualidades de radiação testadas, observou-se que o UV100DC obteve leituras significativamente mais próximas, com um considerável distanciamento apenas nos extremos, a qualidade N30, cuja energia média é de 24 keV, e a energia do césio 137, utilizada para normalização, com energia média de 662

keV. Enquanto isso o UV035D demonstrou um distanciamento mais expressivo nas leituras, evidenciando-se já na qualidade N60, com energia média de 48 keV.

Finalmente, este estudo também compreendeu uma análise da dependência angular, dependência em relação à taxa de dose, repetibilidade e reprodutibilidade dos fotodiodos. O UV100DC se mostrou superior ao UV035D em ambas, reprodutibilidade e repetibilidade, porém ambos com resultados aceitáveis. Nenhum dos fotodiodos apresentaram uma significativa dependência em relação à taxa de dose. Quanto à dependência angular, conforme ilustrado na Figura 14, o UV035D apresentou desempenho superior, no entanto o UV100DC apresenta também baixa sensibilidade para alteração nos ângulos de incidência até 60 graus.

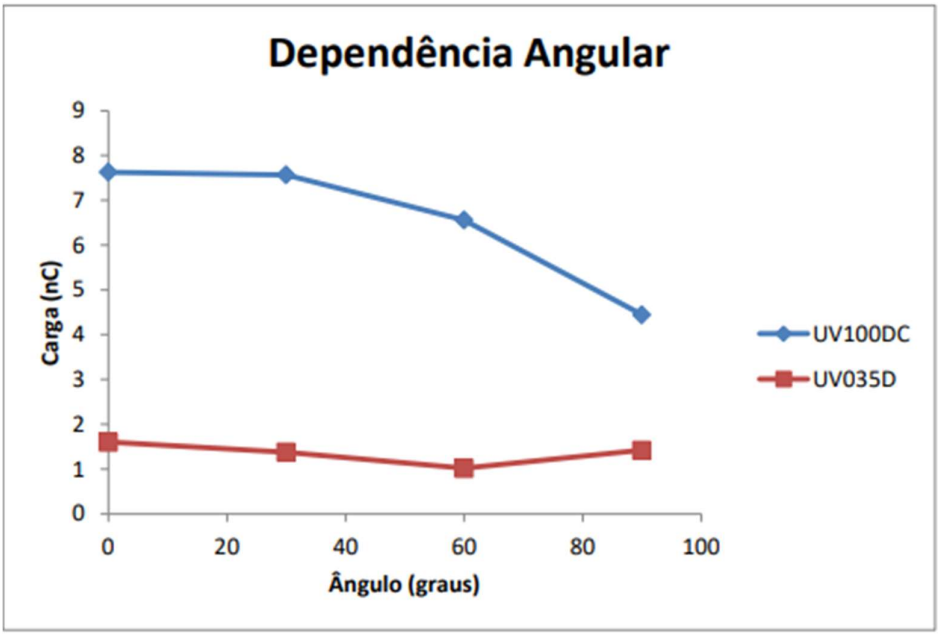


Figura 14 – Dependência angular para os fotodiodos UV100DC e UV035D (fonte: Costa Filho (2021)).

3.3 Análise Crítica

Os transdutores semicondutores, apesar das inúmeras vantagens, apresentam uma elevada dependência energética. Para atenuar esses efeitos, diferentes artifícios são empregados, como o uso de dois diferentes sensores (FUJIBUCHI et al., 2019), o uso de filtros (COSTA FILHO, 2021), ou até diferentes modos de operação selecionados manualmente (NAKAJIMA et al., 2021). Apesar disso, os dosímetros

comerciais, como os discutidos nesse capítulo, possuem uma dependência energética que pode chegar até 25%. Este estudo, portanto, busca fazer uso de filtros, a fim de mitigar essa dependência energética, procurando obter níveis semelhantes aos encontrados no mercado.

Outra vertente de pesquisa até então pouco explorada à integração de comunicação pela internet, via Wi-Fi, com ampla cobertura em quase todo estabelecimento na atualidade. Essa tecnologia pode possibilitar uma operação autônoma e virtualmente ilimitada em termos de alcance, contanto que o aparelho mantenha uma conexão estável à internet. Em sua maioria os dosímetros comerciais para leitura em tempo real transmitem seus dados via rádio, o que, por sua vez, requer o uso de uma estação central e impõe restrições substanciais de alcance, tipicamente restrito a um máximo de 15 metros, acarretando em custos adicionais para sua operação. Em contrapartida, a transmissão de dados pela internet possibilita o envio para servidores em nuvem, onde as informações são processadas, tornando o monitoramento tão acessível quanto a conexão à internet, bastando um dispositivo com tal acesso para possibilitar sua análise, como um tablet, celular ou computador.

3.4 Objetivo

3.4.1 Objetivo Geral

O propósito deste trabalho é desenvolver um dosímetro portátil de leitura direta em tempo real para dosimetria individual, cujo detector é um fotodiodo comercial, dando continuidade à pesquisa desenvolvida por Costa Filho (2021). Para isso foram desenvolvidos e testados circuitos que irão compor o dosímetro. Por fim o dosímetro foi caracterizado e comparado às opções comerciais disponíveis.

3.4.2 Objetivos Específicos

Neste estudo foram desenvolvidos circuitos para leitura, transmissão de dados em e para a amplificação em tempo real, a partir do sinal gerado pelo fotodiodo. Além disso, um módulo de baterias, incluindo um regulador de tensão foram configurados para desempenhar o papel de uma fonte de energia confiável e estável para o dosímetro desenvolvido.

Ademais, após o desenvolvimento e verificação da funcionalidade desses circuitos, foi realizada a sua integração. Essa etapa resulta na montagem do dosímetro propriamente dito, que em seguida foi submetido a um processo de caracterização e análise. Durante esta fase, foi examinado detalhadamente as seguintes características:

- Dependência Energética
- Desempenho de Filtros
- Dependência Angular
- Linearidade
- Repetibilidade e Reprodutibilidade

4 METODOLOGIA

O desenvolvimento, elaboração, análise e caracterização do dosímetro foram realizados no Laboratório de Metrologia das Radiações Ionizantes (LMRI) do Departamento de Energia Nuclear (DEN) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Para isso foram utilizadas as ferramentas e recursos disponíveis no laboratório, incluindo o gerador de raios X, ferramenta essencial para caracterização do dosímetro. Vale ressaltar que o uso do gerador é regulamentado e reservado principalmente para atividades de calibração de equipamentos remetidos ao laboratório.

O dosímetro concebido e objeto deste estudo compreende três componentes fundamentais: um sensor fotodiodo, um circuito de amplificação do sinal emitido por tal sensor, composto por um eletrômetro de elevada sensibilidade, e um circuito dedicado à alimentação, leitura e transmissão. A peça central do dispositivo é o módulo sensor, a ser posicionado na altura do tórax do usuário, capaz de emitir um sinal distintivo em resposta à exposição à radiação. Este módulo é conectado ao módulo lógico e de alimentação por meio de um cabo flexível com extensão de um metro, conferindo versatilidade e comodidade ao sistema. O módulo lógico pode ser convenientemente acomodado no cinto do usuário, onde, além de efetuar a leitura e transmissão dos dados, também regula a tensão da bateria responsável por prover a energia para o conjunto de componentes do dosímetro.

4.1 Escolha do Sensor

O presente estudo dá continuidade à pesquisa realizada por Costa Filho (2021), responsável por caracterizar dois detectores fotodiodos para uso em dosimetria presentes no LMRI. Sendo eles o UV035D e o UV100DC, fabricados pela Optoeletronics.

Com os resultados obtidos, optou-se pelo emprego do fotodiodo UV100DC, em virtude da sua capacidade de gerar uma corrente de maior magnitude quando exposto à radiação ionizante. Esta característica possibilitou a concepção de um circuito com menor ganho, reduzindo, assim, a suscetibilidade a interferências externas. Além disso, o UV100DC apresentou um desempenho superior com relação ao uso de filtros, para mitigar a dependência energética.

Vale salientar que nas ocasiões em que o desempenho do UV100DC ficou aquém do UV035D, como na dependência angular, o primeiro manteve-se em níveis satisfatórios e próximos aos registrados pelo seu concorrente.

Em relação ao encapsulamento do fotodiodo. Inicialmente, o dispositivo foi encapsulado em um suporte a partir de resina, utilizando uma impressora 3D. Esta providência se faz necessária para que o sensor fique seguro e isolado da luz ambiente que poderiam afetar as leituras.

Quanto as conexões, o suporte possui um furo para que possa ser passado um cabo biaxial, que é então conectado aos terminais desse sensor. O fio central do cabo é conectado ao terminal ânodo e o cátodo na malha terra de uma placa de circuito impresso. Na Figura 15 podem ser observadas as conexões realizadas, com o fotodiodo inserido em seu suporte.

Figura 15 – UV100DC em seu suporte conectado ao cabo biaxial (fonte: Costa Filho (2021)).

4.2 Desenvolvimento do Dosímetro

Foi realizada uma revisão bibliográfica em busca de trabalhos similares, os circuitos utilizados e seus desempenhos. Após revisão foram simulados circuitos no software LTSpice, como etapa precursora para a montagem dos mesmos em protoboards e placas ilhada, onde o desempenho de cada configuração foi observado

buscando analisar a linearidade assim como o intervalo de operação dos circuitos desenvolvidos.

4.2.1 Desenvolvimento do circuito de amplificação

Para realização dos ensaios com o eletrômetro concebido foram empregadas duas fontes distintas. A fonte de corrente da Keithley modelo 220, foi utilizada para simular o fotodiodo na entrada do circuito, e a fonte de bancada da Minipa modelo MCP-30003D, foi utilizada para servir como fonte de alimentação quando necessário. Foram injetadas no sistema correntes de 0 a 1,99 nA, e a medição da tensão resultante na saída do eletrômetro se deu por meio do multímetro de bancada da Keithley modelo 2110 5 ½. Os equipamentos utilizados nessa etapa estão dispostos na Figura 16.

Não foram realizadas medidas acima desse patamar pois foi notado que a fonte de corrente não se comportava de maneira linear após a corrente de 2 nA ser atingida. Os resultados obtidos serviram de base para a construção gráficos e para o cálculo do coeficiente de variação nas medidas. Esta análise, executada com auxílio do software Microsoft Excel 2010, teve como objetivo analisar a linearidade e resposta do sistema desenvolvido.

1 2 3

Figura 16 – Equipamentos utilizados para o desenvolvimento da eletrônica. 1-Fonte de corrente da Keithley, modelo 220. 2 - Fonte de bancada da Minipa, modelo MCP-30003D. 3 – Multímetro de bancada também da Keithley, modelo 2110 5 ½ (Fonte: O autor (2023)).

Foram desenvolvidas e testadas três diferentes configurações para o circuito de amplificação. Em duas delas o fotodiodo é conectado ao circuito por meio de um

cabo biaxial. A diferença entre essas configurações é o modo de operação do amplificador: enquanto na primeira configuração, ele opera no modo padrão, na segunda ele opera no modo diferencial. Esta diferença foi motivada pela possibilidade de o cabo biaxial operar como uma antena, captando e inserindo sinais indesejados no circuito, potencialmente causando interferências prejudiciais. A conexão no modo diferencial, portanto, foi selecionada como medida mitigadora para reduzir esse sinal indesejado, aliada à devida blindagem. Adicionalmente, uma terceira configuração foi desenvolvida, onde o UV100DC é conectado diretamente ao amplificador operacional, que opera no modo padrão, eliminando o uso de cabos entre o fotodiodo e amplificador, porém sendo necessário o uso de um encapsulamento maior, para que o circuito seja inserido junto ao fotodiodo.

4.2.2 Desenvolvimento do Circuito de Leitura e Transmissão de Dados

O projeto do circuito encarregado de ler e transmitir os dados gerados pelo sensor é de simples elaboração, uma vez que se vale da implementação de microcontroladores na plataforma Arduino. O objetivo para o circuito é converter um sinal analógico captado para um formato digital, permitindo, em seguida, transmiti-lo, sem fazer uso de fios, para uma unidade autônoma, onde os dados podem ser analisados e armazenados. Serão testados os equipamentos já presentes no laboratório, sendo eles os microcontroladores ESP32 e o Arduino Nano. Para testá-los foi utilizado um potenciômetro de múltiplas voltas para variar a tensão aplicada às entradas dos sensores desses dispositivos, o que possibilitou a identificação dos intervalos de medição, do valor mínimo detectável por cada aparelho, e a avaliação de sua linearidade. Os dados novamente foram analisados com o auxílio da ferramenta Microsoft Excel 2010.

Os circuitos para teste foram montados em protoboards e as conexões estabelecidas por meio de cabos sempre que necessário. A alimentação ficou por conta do cabo USB conectado ao computador, o qual desempenhou adicionalmente a função de transmissor de dados entre os componentes testados e o computador.

4.2.3 Teste de Comunicação Entre os Circuitos

Após validação de ambos circuitos de amplificação e de leitura e transmissão de dados ambos foram testados em conjunto. O teste da comunicação entre eles foi

conduzido de maneira semelhante ao demonstrado na seção anterior para os microcontroladores, no entanto o potenciômetro foi substituído pelo eletrômetro conectado à fonte de corrente. Com isso, a saída do eletrômetro será conectada a entrada do circuito de leitura e transmissão. Durante este procedimento a corrente é variada entre 0 e 1,99 nA. As leituras obtidas na saída do eletrômetro são então realizadas pelo microcontrolador e enviadas para o computador via cabo USB.

4.2.4 Testes da Comunicação Sem Fio

Após teste e validação dos circuitos desenvolvidos, e sua comunicação, eles foram colocados em uma caixa blindada projetada para abrigá-los. O intuito é que o dosímetro seja portátil e envie seus dados sem fazer uso de cabos. Para isso foram projetados circuitos para realizar a alimentação através de baterias. Quanto à comunicação, foram utilizadas duas plataformas a ThingSpeak e a Arduino Cloud, os dados enviados pelo dosímetro eram enviados para essas plataformas onde poderiam ser vistos e anotados em planilha do Microsoft Excel 2010, para análise.

O teste realizado ocorreu de maneira análoga ao teste da comunicação, porém, neste cenário, a transmissão de dados ocorreu por meio de uma rede WiFi. No teste foi injetada uma corrente no eletrômetro e o ESP-32 realizava uma média de 30 medidas e a enviava para o ThingSpeak ou Arduino Cloud. Foram realizadas 3 leituras da média para cada valor de corrente injetada. Por fim os dados recolhidos eram analisados através do Excel, buscando observar a preservação da estabilidade e linearidade do sistema.

Atestada a funcionalidade do sistema, foi então conectado o fotodiodo UV100DC, através de um cabo biaxial ou, alternativamente, soldando-o diretamente à placa ilhada. Os resultados foram então analisados no intuito de selecionar a melhor configuração. Então o dosímetro foi levado ao gerador de raios X, para sua caracterização.

4.3 Caracterização do Dosímetro

Para a caracterização do dosímetro foi utilizado o gerador de raios X industrial da Comet, modelo MXR-321, presente no laboratório. Na Figura 17 o MXR-321 pode ser observado, assim como a roda de filtros e o colimador.

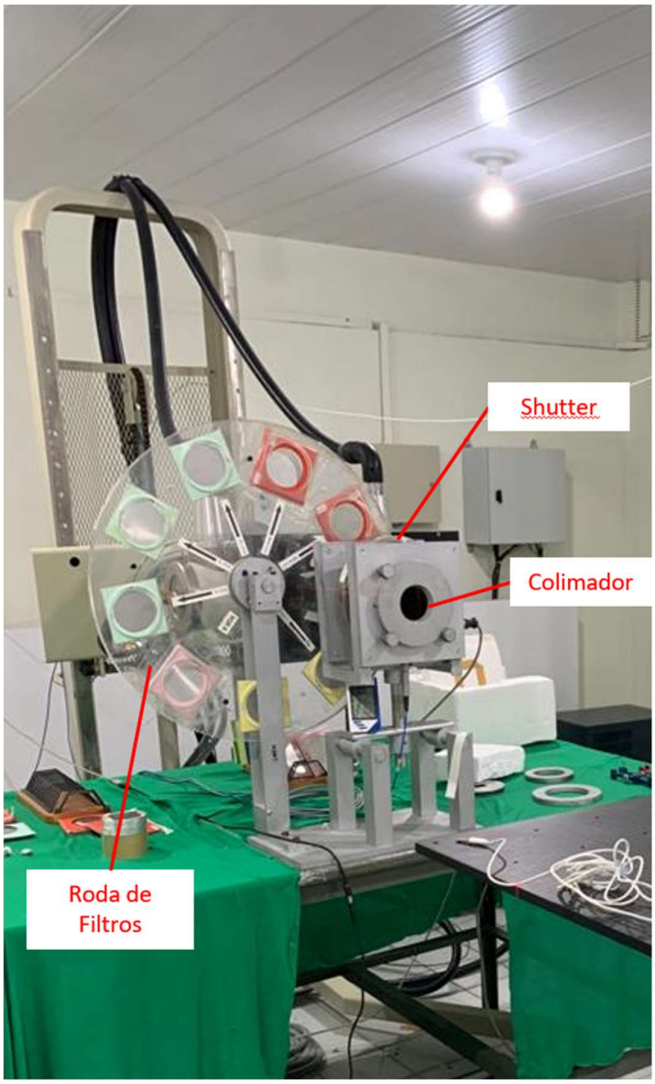


Figura 17 – Gerador de raios X da Comet, modelo MXR-321 (fonte: O autor (2023)).

Ao ser irradiado foi analisada a dependência energética do dosímetro quando submetido a irradiação. Permitindo compreender a influência de diferentes energias de radiação nos resultados obtidos, questão também explorada por Costa Filho (2021), na caracterização do UV100DC. Para mitigar essa dependência foram utilizados filtros de cobre.

Em seguida foram realizados testes da linearidade, explorando como suas respostas se comportam em relação às doses de radiação aplicadas. Além disso, foi examinada a dependência angular, analisando como o ângulo de incidência afeta as medições. Por fim, foram empenhados testes de repetibilidade e reprodutibilidade, afim de verificar a consistência e confiabilidade do dosímetro. Os procedimentos realizados para cada teste são descritos em mais detalhes a seguir.

4.3.2.1 Dependência Energética

Nesta etapa do estudo, foi dado procedimento à irradiação do dosímetro, foram realizadas medidas para as qualidades de radioproteção ISO N, mais especificamente, as qualidades N40, N60, N80, N100, N120 e N150. Para assegurar que a dose irradiada fosse uniforme em todas as qualidades mencionadas, o tempo de exposição para cada qualidade foi calculado. Os resultados sesses cálculos, bem como a energia média, a corrente e tensão de tubo e a taxa de Kerma-ar, para cada qualidade estão apresentados de maneira detalhada na Tabela 5 a seguir. Durante a realização dos testes o sensor do dosímetro foi posicionado a uma distância de 1,5 metros da fonte de raios X. Ao início do teste foram realizadas 5 medidas do background para futura correção das medições.

Tabela 5 – Tempo de exposição e as características para cada qualidade testada (fonte: O autor (2023)).

ISO N	Tempo de exposição (s)	Tensão de tubo (kV)	Corrente de tubo (mA)	Energia média (keV)	Taxa de Kerma-ar (μGy/min)
N40	33,40	40	10	33	304,77
N60	20,00	60	10	48	509,03
N80	42,10	80	10	65	241,85
N100	58,34	100	15	83	174,51
N120	52,32	120	15	100	194,60
N150	10,36	150	10	118	983,02

A coleta de dados procedeu da seguinte forma: após abertura do shutter do gerador de raios X, o dosímetro registrava as medidas integradas nos intervalos de tempo estabelecidos para cada qualidade de radioproteção testada. Esse processo foi repetido cinco vezes para cada qualidade, com as leituras sendo posteriormente corrigidas pelo fator de temperatura e pressão, calculado segundo a equação 1. Todas informações foram então armazenadas em uma planilha do Microsoft Excel 2010. Paralelamente, os valores exibidos pela câmera monitora foram registrados e utilizados para correção das medições.

$$LCM = \frac{\left(\frac{101,325}{P}\right)*(T+27\ ,15)}{293,15};\qquad (1)$$

Onde LCM é o fator de correção, P é a pressão em kPa e T a temperatura em graus Celsius.

Com os dados coletados e processados foi então gerado um gráfico que relaciona a média das respostas fornecidas pelo dosímetro à energia média de cada qualidade de radioproteção testada. Esse gráfico permitiu a análise da dependência energética do dosímetro antes da aplicação do filtro. Também foi obtido o coeficiente de variação para cada qualidade. É importante notar que todas as medidas realizadas foram corrigidas pelo background, o qual foi determinado com base em cinco medidas realizadas antes e depois da bateria de testes, e sua média subtraída das leituras realizadas durante irradiação.

4.3.2.2 Análise do Desempenho de Filtros

Os filtros empregados nesta pesquisa são compostos de cobre, com espessura de 0,09 mm, presentes no laboratório. A espessura é gradativamente ampliada ao serem adicionadas mais camadas de cobre. Abaixo na Figura 18 pode ser visto um exemplo de uma camada do filtro utilizado.

Figura 18 – Camada do filtro utilizado para amenizar a dependência energética do dosímetro (fonte: Costa Filho (2021)).

Em seu trabalho Costa Filho (2021) realizou medidas empregando um filtro de 0,54 mm, equivalente a seis camadas superpostas. Neste contexto, o presente trabalho empreendeu a investigação da dependência energética, expandindo a análise além do ponto estabelecido por Costa Filho. O número de camadas foi estendido duas até um total de oito, incrementando uma camada por vez, considerando as limitações do tempo disponível para pesquisa no gerador de raio-X.

Para isso foram utilizadas as qualidades N40, N60, N80, N100, N120 e N150, reproduzindo o teste da dependência energética, porém com a adição de camadas de filtros posicionadas à frente do fotodiodo. Os gráficos e dados obtidos são comparados entre si, visando identificar a configuração que proporciona o melhor desempenho, que foi então utilizada para os testes de linearidade e dependência angular.

4.3.2.3 Linearidade

Nesta avaliação foi conduzida uma análise das medidas obtidas para diferentes doses de radiação em diferentes qualidades de radioproteção. Para isso o dosímetro foi irradiado novamente, dessa vez com o uso do Phantom equivalente de dose pessoal Hp (10) a uma distância de um metro e meio da fonte de raios X. As qualidades utilizadas nesse teste foram a N80, N100, N120 e N150. A fim de variar as doses os tempos de irradiação foram variados, utilizando quatro intervalos temporais distintos, nomeadamente 5, 10, 15 e 20 segundos, realizando cinco medidas para cada valor de dose investigada. Os valores das doses correspondentes a cada intervalo de tempo encontram-se detalhados na Tabela 6.

Tabela 6 – Valores de dose pra cada intervalo de tempo e qualidade de radioproteção

ISO N	mSv/s	5s (mSv/s)	10s (mSv/s)	15s (mSv/s)	20s (mSv/s)
N80	0,00718	0,03590	0,07180	0,10770	0,14360
N100	0,00531	0,02655	0,05310	0,07965	0,10620
N120	0,00584	0,02919	0,05838	0,08757	0,11676
N150	0,02787	0,13935	0,27870	0,41805	0,55740

Fonte: O autor (2023).

Após o teste as leituras foram armazenadas em planilha no software Microsoft Excel 2010. Nesse ambiente foram calculadas as médias obtidas para cada dose investigada, em seguida foram traçados gráficos de dispersão com as linhas de tendência para cada qualidade de radioproteção. A análise concentrou-se na avaliação da linearidade e coeficiente angular associado a cada reta representativa dos resultados.

4.3.2.5 Dependência Angular

Neste procedimento o dosímetro foi submetido a irradiação sob várias incidências angulares distintas, com subsequente avaliação de sua resposta. As medidas foram conduzidas para a qualidade de radioproteção N80, com intervalos de integração de 30 segundos. Estas avaliações empregaram o do Phantom para o equivalente de dose pessoal Hp (10), mantendo uma distância fixa de 1,5 m.

Os ângulos selecionados para análise compreenderam 0º, 30º, 60º e 90º. Para possibilitar a exatidão na variação dos ângulos de incidência, foi empregado um suporte giratório especialmente projetado, incorporando marcações indicativas para as posições angulares desejadas. Tal suporte pode ser visto na Figura 18.

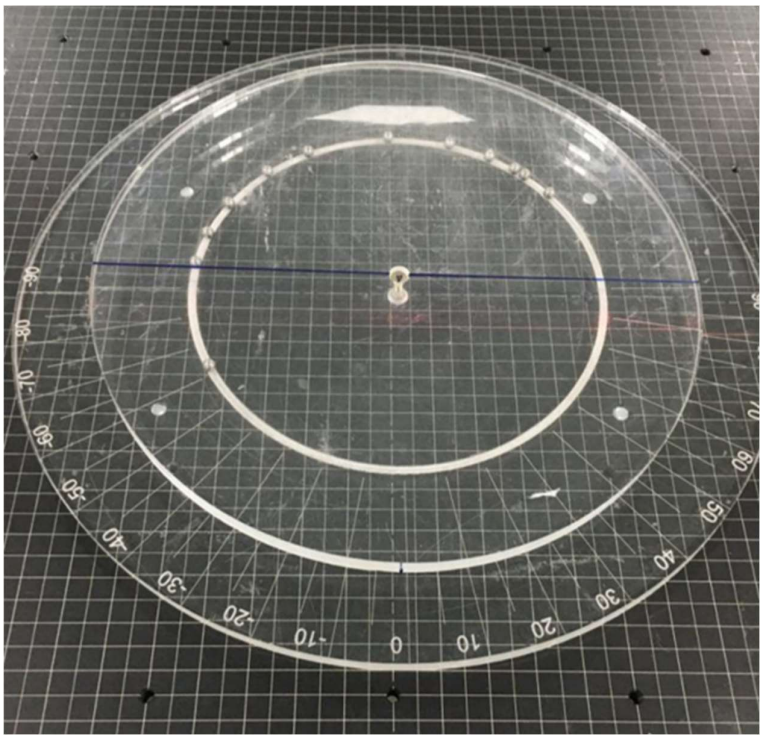


Figura 19 – Suporte giratório utilizado para os testes de dependência angular (fonte: Costa Filho (2021)).

4.3.2.6 Repetibilidade e Reprodutibilidade

Para a reprodutibilidade foram realizadas medidas, seguindo uma abordagem análoga àquela delineada por Costa Filho (2021), respeitando os limites impostos na ISO 5725-1. Durando o experimento, foram conduzidas medidas na qualidade N80, por 42,1 segundos de irradiação para cada medida, com o sensor posicionado a uma distância de 1,5 m da fonte, sem filtros e sem o uso do Phantom. Novamente o shutter foi aberto e a cada 42,1 segundos foram enviadas medidas integralizadas que foram então coletadas. Foram coletadas cinco medidas para cada dia, ao longo de um período de apenas três dias, devido ao tempo limitado para testes disponível.

A avaliação da reprodutibilidade baseou-se no cálculo das médias resultantes das cinco medidas obtidas em cada sessão experimental. Essas médias foram então utilizadas na construção de um gráfico, o qual busca evidenciar a consistência dos resultados. No gráfico as médias de cada dia são normalizadas pela média total e se espera que haja uma variação percentual não excedente a ±10%.

No que concerne à avaliação da repetibilidade, os coeficientes de variação correspondentes a cada medida foram calculados, empregando a equação 2, CV é o coeficiente de variação em porcentagem, $\bar{x}$ é a média calculada e σ_x o desvio padrão. É esperado que esses não variem mais que 5%, indicando uma estabilidade desejável nos resultados ao longo dos testes.

$$CV\ (\%) = \frac{\sigma_x}{\bar{x}} * 100; \quad (2)$$

5 ESTUDO DE CASO

5.1 Desenvolvimento da Eletrônica

Para análise do circuito de leitura e transmissão de dados havia, de início, um planejamento para avaliação de dois possíveis sistemas, o primeiro o ESP-32, da Espressif, para realizar as medidas analógicas e transmitir os dados através da tecnologia Wi-Fi. O segundo sistema era o Arduino nano, também capacitado para realizar as medidas analógicas, mas com uma abordagem diferente na transmissão de dados, fazendo uso módulo de rádio dedicado. As interconexões foram feitas em uma Protoboard, com o uso de cabos para realizar as ligações necessárias. As montagens podem ser vistas na Figura 20.

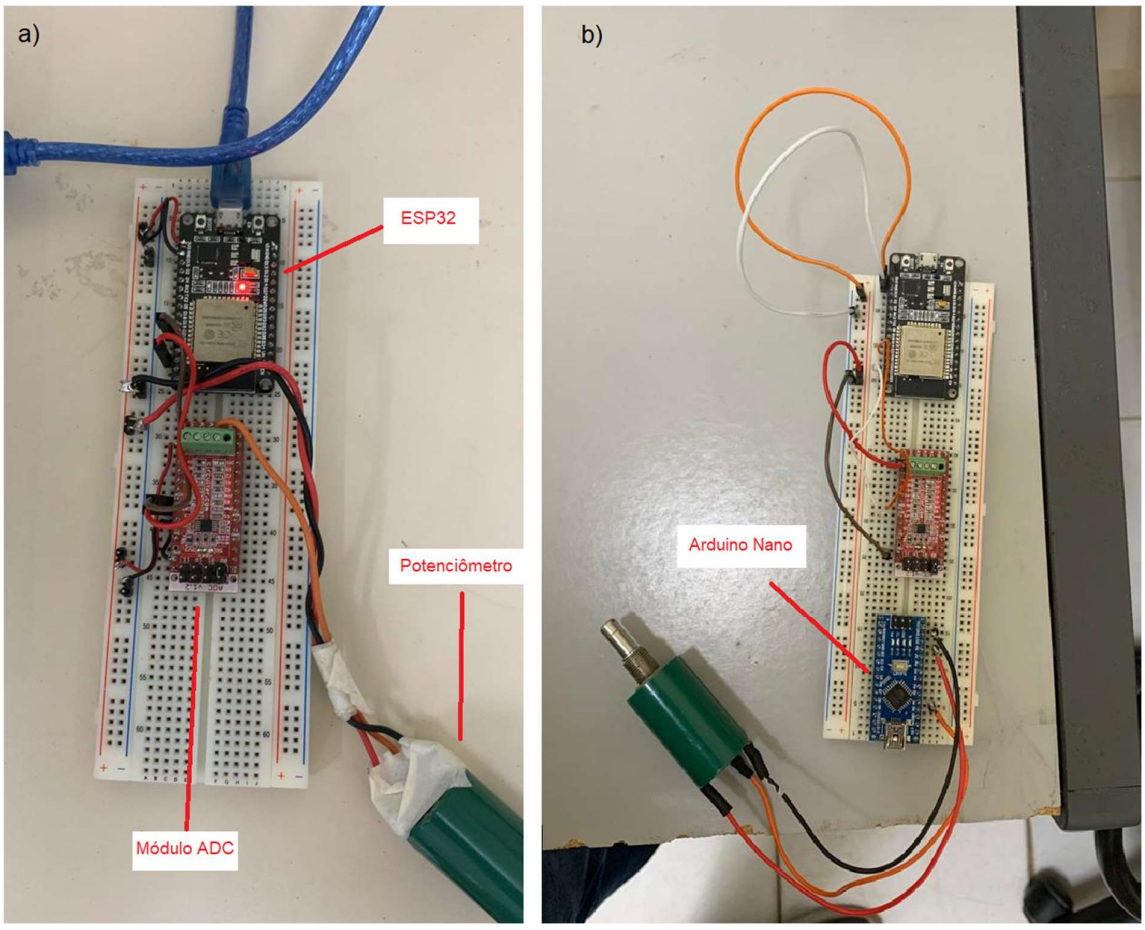


Figura 20 – a) Teste do ESP-32 em conjunto com o ADS1115 em protoboard b) Teste do Arduino nano em protoboard (fonte: O autor (2023)).

No estágio inicial dos experimentos foi observado que o controlador ESP-32 era capaz de realizar leituras analógicas a partir de uma tensão mínima de e 100 mV. Devido à necessidade de uma maior precisão foi empregado o uso de um módulo ADC, o ADS1115 da Texas Instruments, com precisão de 16 bits, conforme ilustrado na Figura 20. O módulo era responsável pela conversão do sinal analógico em digital, sendo utilizado em conjunto com o ESP-32. A comunicação entre os sistemas foi feita através do protocolo I2C.

Como evidenciado nos Gráficos 1 e 2 ambos sistemas apresentaram uma excelente linearidade, caracterizadas por coeficientes de determinação (R^2) de 0,9999. No entanto a precisão do Arduino Nano ficou consideravelmente aquém daquela alcançada pelo sistema composto pelo ESP-32 conectado ao módulo ADC. Enquanto o ESP32 demonstrou a capacidade de realizar leituras em uma faixa abrangente, de 1 até 3300 mV, o Nano teve o menor valor medido de 12 mV. Além disso, vale ressaltar que o controlador ESP-32 oferece uma vantagem adicional, dada a sua integração com funcionalidades de comunicação sem fio, simplificando significativamente a transmissão de dados e facilitando o desenvolvimento do dosímetro. Por essas razões, foi escolhido o ESP32, aliado ao módulo ADC, para formar o circuito de aquisição e transmissão de dados.

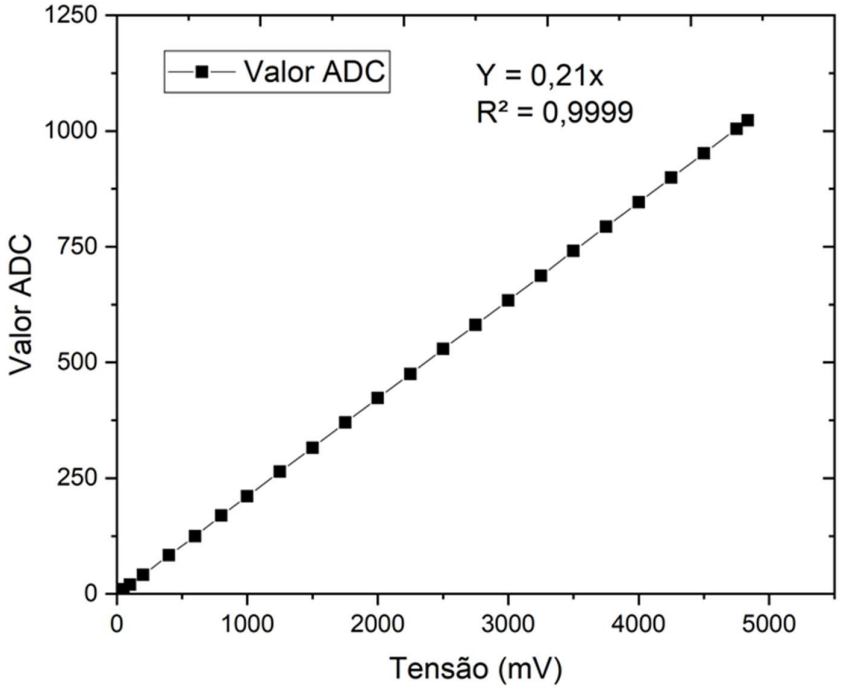


Gráfico 1 – Teste do Arduino Nano para leituras analógicas (fonte: O autor (2023)).

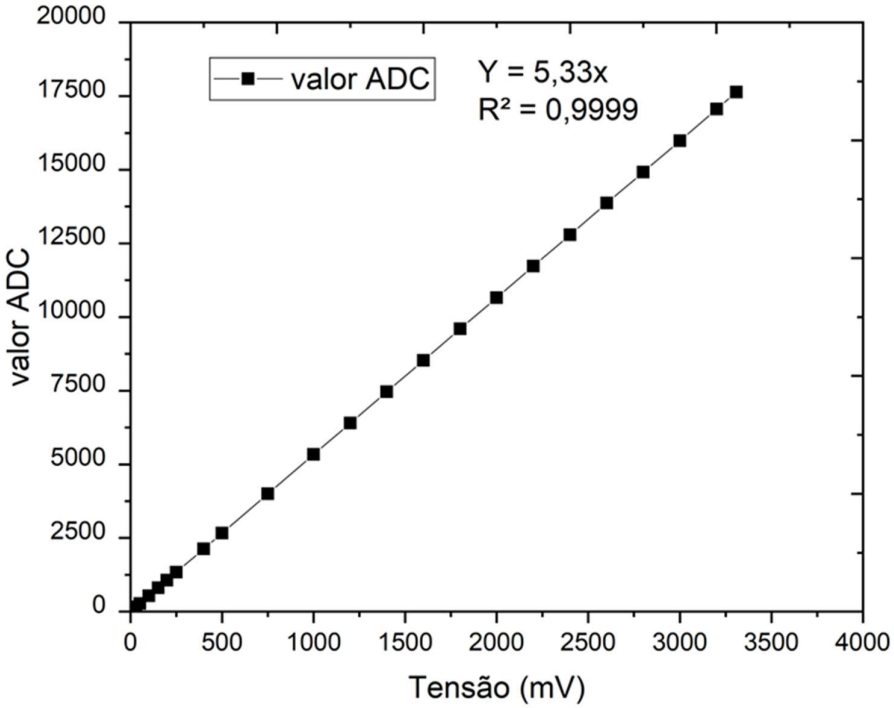


Gráfico 2 – Teste do módulo ADC com o ESP-32 para leituras analógicas (fonte: O autor (2023)).

Concomitantemente aos testes do sistema de leitura e transmissão, estava sendo realizado o desenvolvimento do eletrômetro. Este dispositivo faz uso de dois amplificadores operacionais e desempenha um papel crucial no processo de conversão e amplificação do sinal produzido pelo fotodiodo. Em outras palavras, a conversão da corrente elétrica em tensão de maneira linear, para possibilitar a aquisição de dados do sistema de leitura e transmissão de dados. Como previamente explanado na sessão anterior, foram concebidas três diferentes configurações para o circuito de amplificação. A seguir serão discutidos os resultados obtidos para cada uma dessas configurações.

5.1.1 Modo de operação padrão com cabo

O esquema da primeira configuração do eletrômetro é apresentado no Anexo A, onde o fotodiodo se conecta por meio de um cabo biaxial. Neste esquema o cátodo do fotodiodo é ligado ao amplificador e o ânodo é conectado à referência de terra. O circuito já estava montado, no laboratório, em uma placa de circuito impresso e

empregava o uso do amplificador operacional de dois estágios LMC662, da Texas Instruments. Foram realizadas alterações no circuito de forma a garantir um ganho de 1.000.000 no primeiro estágio e de 100 no segundo, totalizando assim um ganho de 10^8. É relevante notar que o ganho é ditado pelos resistores de retroalimentação e de entrada.

O Gráfico 1 apresenta a resposta linear do eletrôemtro, com coeficiente de correlação de Pearson (R^2) no valor de 0,999, muito próximo da unidade. Também podemos ver que o sistema demonstrou um ganho de 105,89 mV/nA, ou 105.890.000 V/A, próximo do valor de 10^8 esperado.

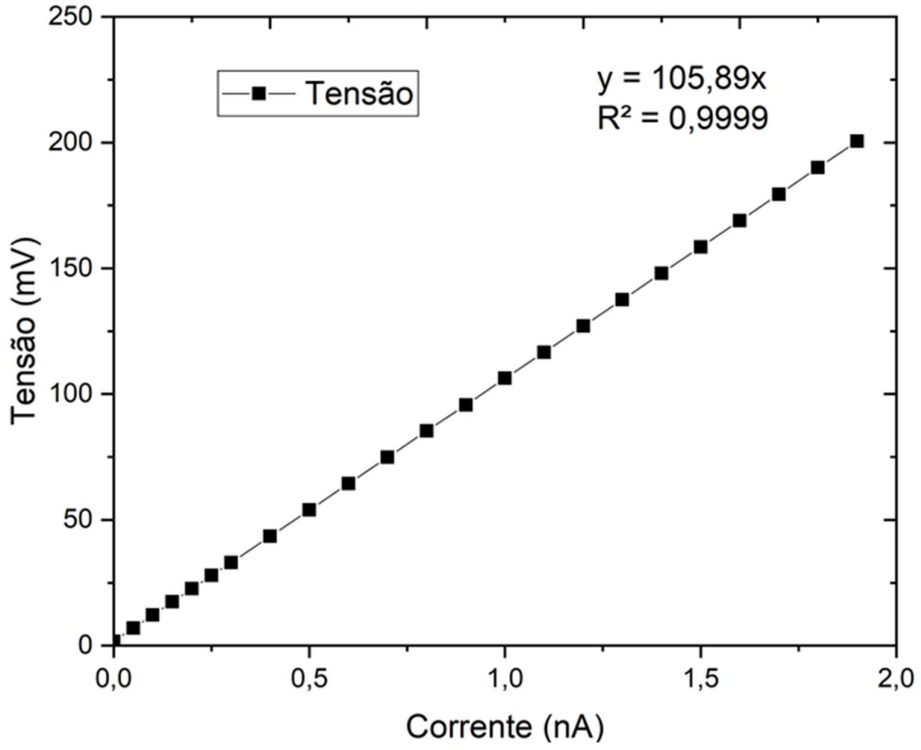


Gráfico 3 – Teste do comportamento do eletrômetro (fonte: O autor (2023)).

Ambos os sistemas, o eletrômetro e o ESP32, apresentaram resultados aceitáveis durante os testes individuais. Assim, foram testados em conjuntos. Para isso foi reutilizada a fonte de corrente conectada com a entrada do eletrômetro, já a tensão na saída foi medida pelo sistema composto pelo módulo ADC com o ESP-32. Deve ser destacado que o eletrômetro estava sendo alimentado com fonte simétrica de ±3,3V, devido às limitações operacionais do ESP32, cuja leitura de dados se limita até 3,3 V.

Além disso, foi observado que o ganho do sistema poderia ser incrementado em um fator de 10, sem comprometer as medidas, uma vez que a tensão máxima observadas se aproximou de apenas 200 mV. Com a mudança essa tensão iria para cerca de 2 V, ainda muito abaixo do limite de 3,3 V suportado pelo ESP-32.

Como ilustrado no Gráfico 4, os sistemas se comportaram bem juntos. Mais uma vez, o coeficiente de Pearson manteve-se muito próximo da unidade. A corrente foi variada de 0 até 1,99 nA. Não foram realizadas medidas acima disso pois a fonte de corrente não se comportava linearmente a partir de 2 nA. Foram realizadas 30 medidas para cada ponto, com médias subsequentemente computadas. Na Tabela 7 podem ser vistos os coeficientes de variação para cada valor de corrente testado. Houve apenas uma variação maior no 0, cujo coeficiente de variação ficou próximo de 10%. O ganho do sistema ficou próximo do esperado, em torno de 5386, para as leituras do ESP-32. Uma vez que 1 mV correspondem a 5,33 unidades de leitura do ESP32, como demonstrado no gráfico 3, o ganho do eletrômetro ficou próximo do valor esperado de 10^9 V/A.

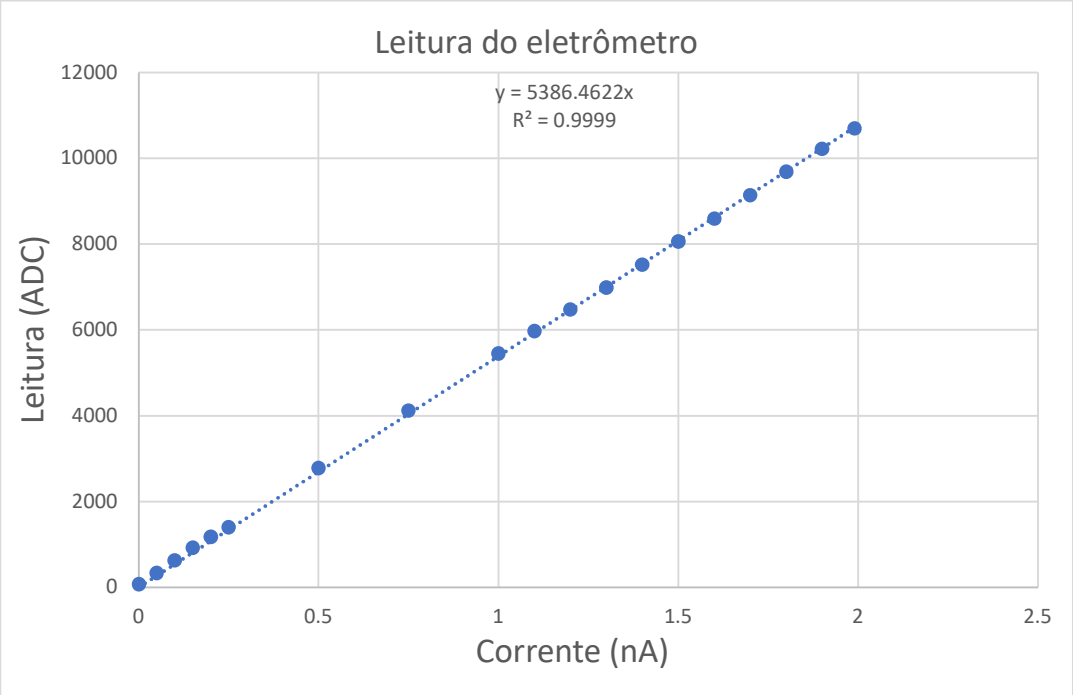


Gráfico 4 – Teste do eletrômetro acoplado ao ESP-32 (fonte: O autor (2023)).

Tabela 7 – Coeficiente de variação e desvio padrão em cada valor de corrente testado (fonte: O autor (2023)).

Corrente (nA)	DESV.PAD.	C.V. (%)
0	7,77	10,93
0,05	6,37	1,90
0,10	7,17	1,15
0,15	10,62	1,15
0,20	10,17	0,87
0,25	6,24	0,45
0,50	15,81	0,57
0,75	16,96	0,41
1,00	11,58	0,21
1,10	32,02	0,54
1,20	13,92	0,21
1,30	9,93	0,14
1,40	10,41	0,14
1,50	13,45	0,17
1,60	10,57	0,12
1,70	11,34	0,12
1,80	14,57	0,15
1,90	11,87	0,12
1.99	13,12	0,12

Dando prosseguimento, ambos sistemas foram acomodados dentro da caixa blindada, responsável por abrigar a eletrônica do dosímetro durante a fase experimental, afim de diminuir as interferências eletromagnéticas. A montagem deles na caixa é demonstrada na figura 21.

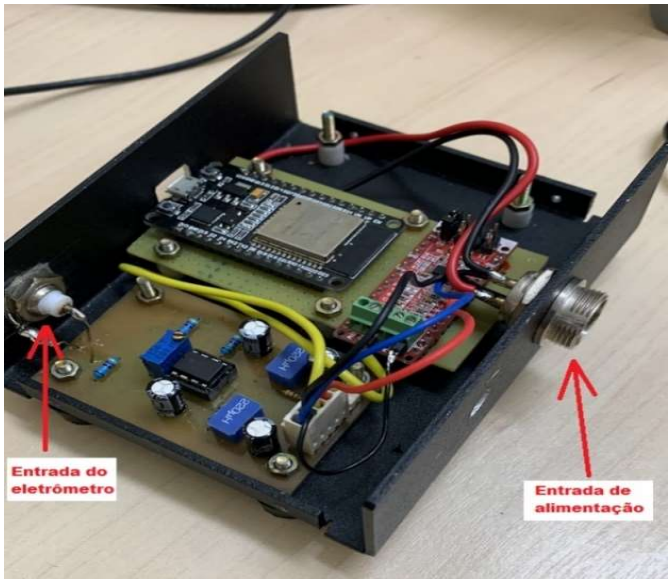


Figura 21 – Teste da comunicação entre eletrômetro e o ESP-32 dentro da caixa blindada (fonte: O autor (2023)).

Como pode ser visto pelo Gráfico 5, o sistema manteve sua linearidade, com R^2 próximo da unidade. Na Tabela 8 podemos ver que o coeficiente de variação aparentou ser muito elevado na ausência de corrente, porém o valor absoluto dessa variação foi ínfimo em relação à média da menor leitura, que ficou em torno de 460 ADC. Importante notar que o sistema atingiu saturação em 1,75 nA nessa configuração.

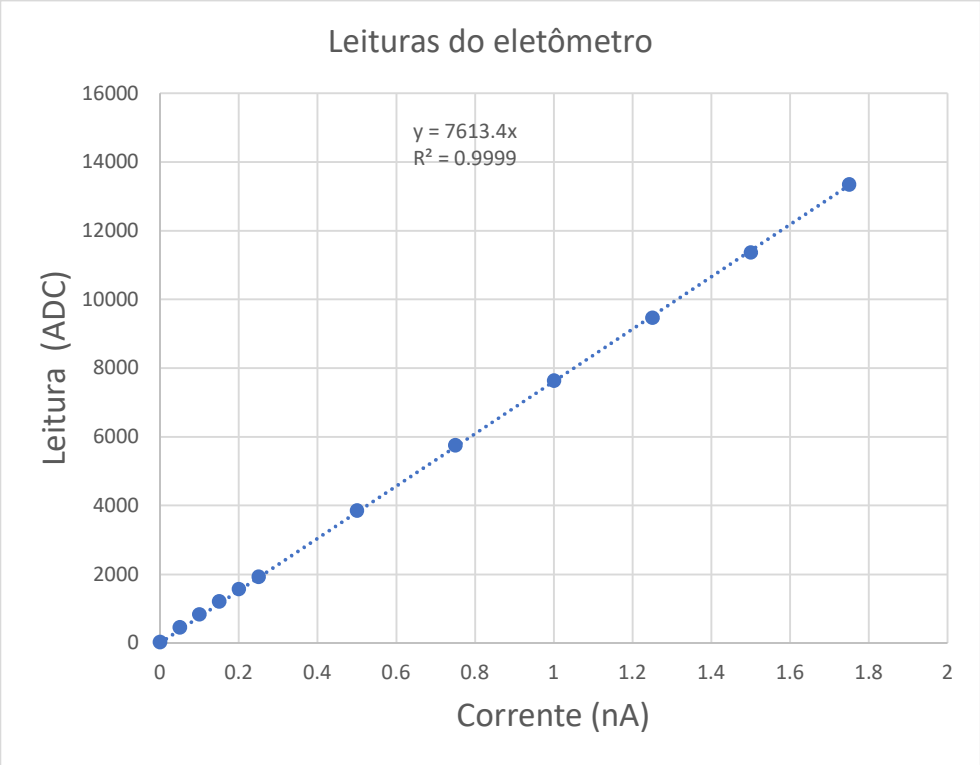


Gráfico 5 – Teste do eletrômetro acoplado ao ESP-32, dentro da caixa blindada (fonte: O autor (2023)).

Tabela 8 – Coeficiente de variação e desvio padrão em cada valor de corrente testado, dentro da caixa blindada (fonte: O autor (2023)).

Corrente (nA)	DESV.PAD.	C.V. (%)
0	21,27	72,59
0,05	18,84	4,09
0,10	18,66	2,24
0,15	22,89	1,90
0,20	22,2	1,41
0,25	21,37	1,11
0,50	30,84	0,80
0,75	32,86	0,57
1,00	34,12	0,45
1,25	34,51	0,36
1,50	23,66	0,21
1,75	37,07	0,28
1,80	70,26	0,54

Finalmente, a fim de prover a portabilidade necessária ao sistema foi desenvolvido um regulador de tensão a ser usado em conjunto com duas baterias de

9 volts, ligadas em série onde o terra é a conexão entre o terminal positivo de uma com o negativo de outra, com o regulador de tensão reduzindo-a para os 3,3 V e – 3,3 V requeridos para operação do circuito, assim eliminando a necessidade de uma fonte de bancada. No entanto as baterias se mostraram insuficientes para lidar com a demanda de corrente do circuito, e na ausência de baterias de lítio no laboratório durante esses testes, foi dado seguimento utilizando a fonte de bancada, calibrada para ±9 V. A montagem desse sistema pode ser vista na Figura 22.

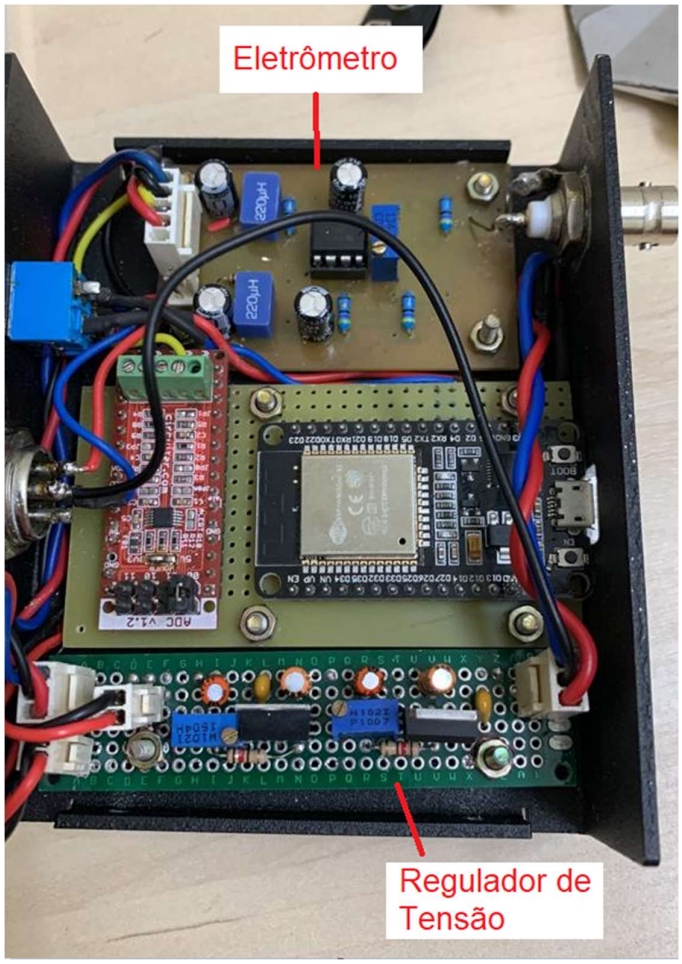


Figura 22 – Montagem do sistema com regulador de tensão (fonte: O autor (2023)).

Como o sistema deve ser portátil foi implementado a comunicação via WiFi, para transmitir as leituras ao computador onde eram armazenadas e analisadas. A plataforma utilizada para o envio de dados foi a IOT thingspeak.

Como era de se esperar, para correntes muito próximas de 0 nA, como pode ser visto na Tabela 9, o valor do coeficiente de variação ficou mais elevado, porém

novamente com o valor absoluto do desvio padrão em ADC muito abaixo da leitura mínima. O sistema se manteve linear como também mostra o Gráfico 6.

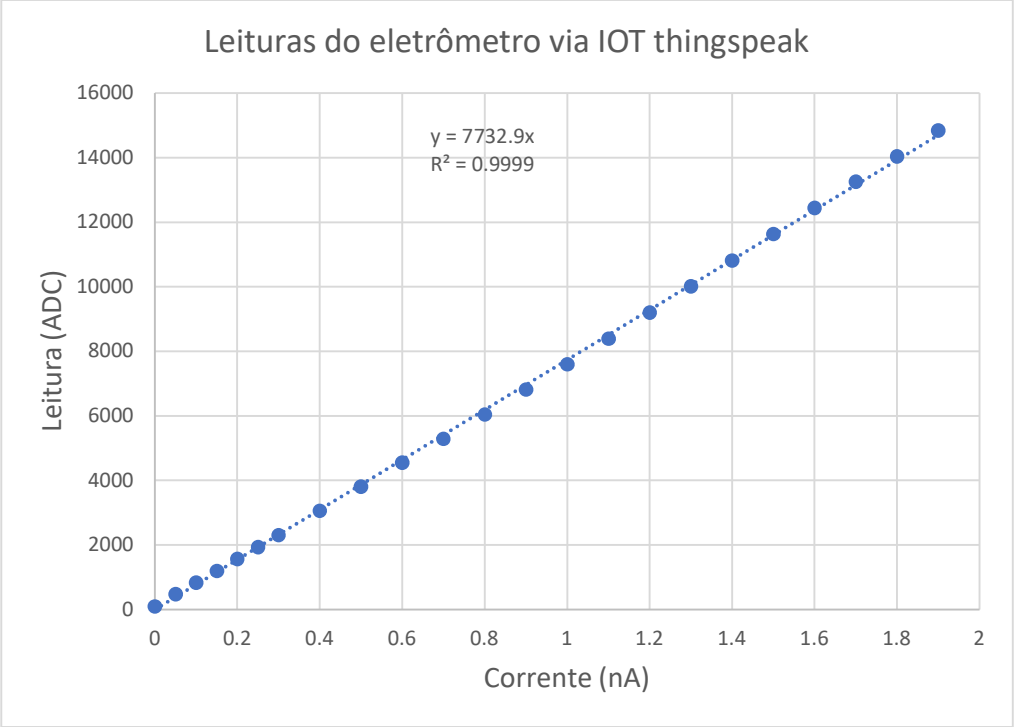


Gráfico 6 – Teste do eletrômetro acoplado ao ESP-32, com o IOT thingspeak (fonte: O autor (2023)).

Tabela 9 – Coeficiente de variação e desvio padrão em cada valor de corrente testado, com o IOT thingspeak (fonte: O autor (2023)).

Corrente (nA)	Desvio Padrão	C.V. (%)
0	6,27	63,83
0,05	4,63	9,65
0,10	4,99	5,98
0,15	3,56	2,97
0,20	2,74	1,75
0,25	2,05	1,06
0,30	1,91	0,83
0,40	2,17	0,71
0,50	2,52	0,66
0,60	3,28	0,72
0,70	3,79	0,72
0,80	4,07	0,67
0,90	2,82	0,41
1,00	2,77	0,36
1,10	2,55	0,30
1,20	1,47	0,16
1,30	1,45	0,15
1,40	2,76	0,26
1,50	7,83	0,67
1,60	10,56	0,85
1,70	22,13	1,67
1,80	26,35	1,88
1,90	35,51	2,39

Ao inserir o sistema dentro da caixa blindada, foi notado um aumento no ganho do sistema, como pode ser visto pelas equações dos gráficos 5 e 6. Pelas equações das retas obtidas, os ganhos foram de 7613,4 e 7732,9, uma variação menor que 1%, em ambos os testes com a montagem dentro da caixa blindada. Este ganho se manteve estável e dentro dos padrões desejados, possibilitando realizar as medidas das correntes desejadas. Assim foi dada continuidade aos testes.

Em seguida o sistema foi testado conectado ao fotodiodo e levado ao gerador de raios X. A montagem para o teste pode ser vista na figura 23. O fotodiodo é conectado à entrada do eletrômetro via cabo biaxial, e a fonte de bancada alimenta o sistema. No entanto, antes de dar início à irradiação, foi observado que a tensão de offset não estava estável.

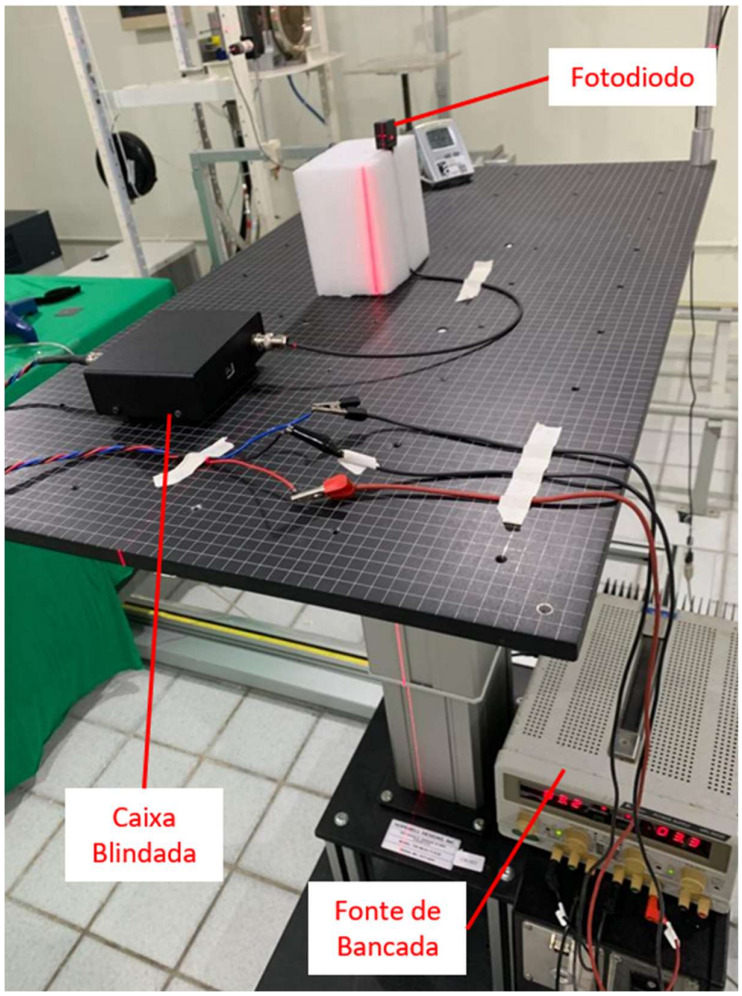


Figura 23 – Montagem do teste da primeira configuração do eletrômetro no raio X (fonte: O autor (2023)).

Em análise com o auxílio de osciloscópio na saída do eletrômetro foi notada uma interferência na frequência de 60 Hz, como pode ser visto na Figura 24. O cabo biaxial estava atuando como uma antena para o campo eletromagnético gerado pela rede elétrica. A interferência era apenas observada com o uso do cabo ligado ao fotodiodo.

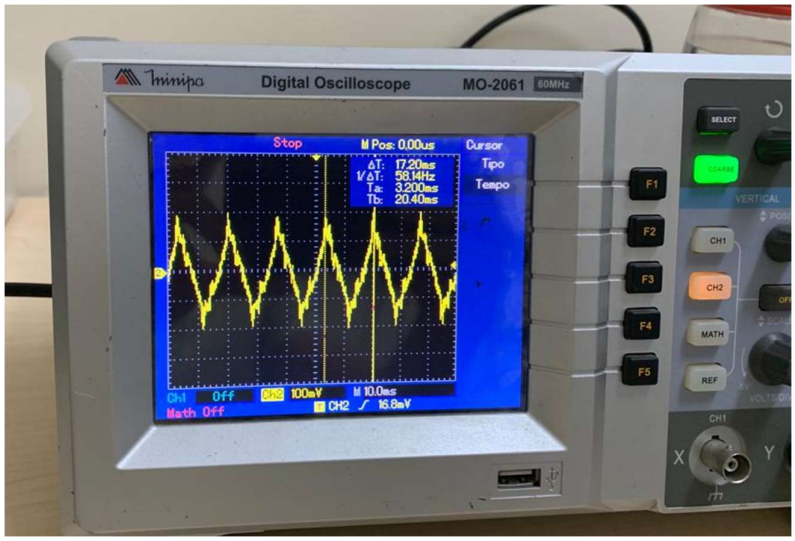


Figura 24 – Leitura do Osciloscópio da interferência observada ao conectar o fotodiodo com o eletrômetro por meio do cabo biaxial (fonte: O autor (2023)).

5.1.2 Modo de operação diferencial com cabo

Nesse circuito, os terminais do fotodiodo são conectados às entradas do primeiro estágio do LMC662, mais especificamente na porta 2, para o cátodo, e na porta 3 para o ânodo, assim passando a operar no modo diferencial. A malha externa do cabo é então aterrada para garantir a integridade do sinal. Além disso foi inserido um circuito para correção do offset na entrada, com o uso do TL431, um potenciômetro e resistores.

A montagem para testes do sistema foi feita em uma protoboard e pode ser vista na Figura 25, onde está sendo alimentada pela fonte de bancada, dessa vez configurada como uma fonte simétrica de ±5 V e conecta ao fotodiodo pelo cabo biaxial. O LMC662 foi colocado em um encapsulamento do tipo DIP, sigla para o inglês *Dual In-Line Package*, para que pudesse ser conectado à protoboard.

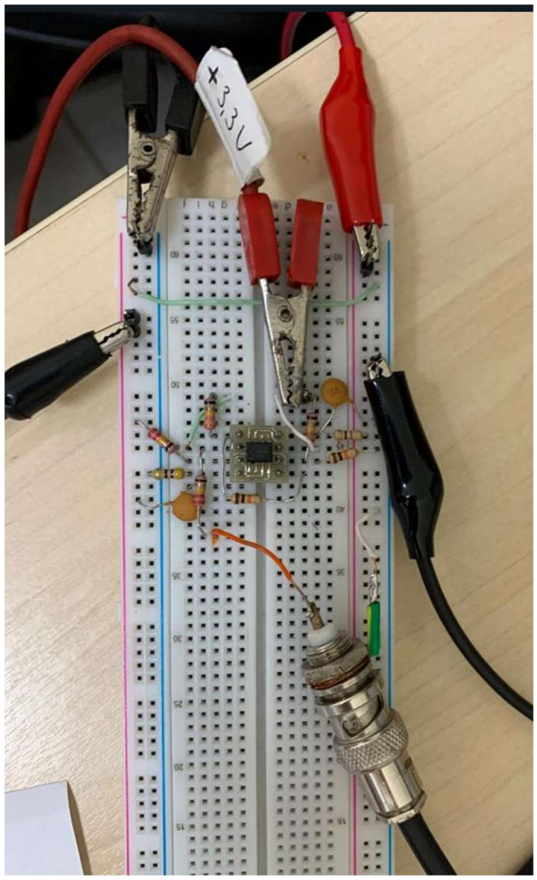


Figura 25 – Montagem da configuração em modo diferencial com conexão via cabo biaxial (fonte: O autor (2023)).

Apesar dos esforços, ao conectar o fotodiodo aos terminais, novamente foi detectado o sinal de 60 Hz, proveniente da interferência eletromagnética causada pela rede elétrica.

5.1.3 Modo de operação padrão sem cabo

O circuito desenvolvido para esta configuração foi inspirado no circuito desenvolvido por Yamaguchi et al. (2019), onde o LMC662 também foi utilizado, apresentando bons resultados. Com um design mais simples, é possível que, mesmo com o fotodiodo conectado diretamente, o sensor continue com um tamanho reduzido.

Algumas alterações foram introduzidas no design de tal circuito, para adaptá-lo ao trabalho desenvolvido. Sendo uma delas o uso de diferentes resistores para se obter um ganho de 10^9. Como se buscava um circuito de dimensões compactas, foram utilizados, em sua maioria, componentes de montagem superficial (SMD). Na Figura

24 pode ser visto o circuito do eletrômetro. Novamente foi utilizado o Tl431 e um potenciômetro para correção do offset, porém dessa vez com um circuito alternativo, como é retratado no esquema provido. Este circuito foi então montado em uma placa ilhada. O ganho calculado para esse circuito será dado pelas equações 3 e 4, respectivamente para o primeiro e segundo estágio, onde R_i representa os resistores apresentados na Figura 26.

$$Ganho = \frac{R_2}{R_1} \tag{3}$$

$$Ganho = \left(\frac{R_4}{R_5} + 1\right) \tag{4}$$

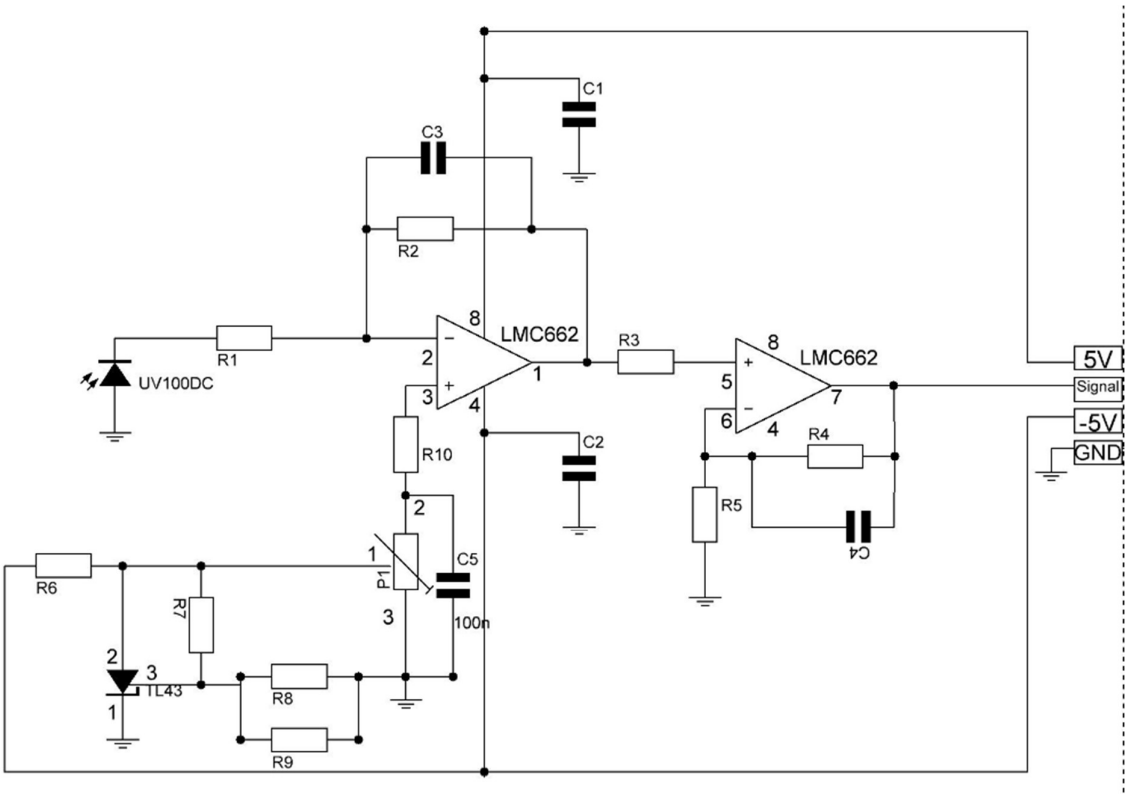


Figura 26 – Versão final do eletrômetro (fonte: O autor (2023)).

Durante a fase de elaboração dessa configuração, o laboratório adquiriu novos componentes que foram utilizados de forma a melhorar o funcionamento dos circuitos. Dentre eles o ICL 7660, componente responsável por converter, com precisão, uma tensão de corrente contínua positiva para negativa de maneira estável. Esse

componente foi montado juntamente ao circuito composto por dois capacitores especificado em seu datasheet. Além disso, foram incorporadas baterias de Lítio, de 2000 mAh de capacidade e tensão de 3,7 V, fornecendo a energia necessária para o sistema de maneira estável. Por fim, afim de assegurar uma comunicação viável entre o módulo ADC e o ESP32, foi empregado o uso de um conversor de nível lógico, permitindo que o módulo ADC operasse no modo 5 V, sem comprometer o ESP32. Esse avanço também possibilitou com que o LMC662 fosse alimentado com uma tensão simétrica de ±5 V, conforme recomendado pelo fabricante em seu datasheet, garantido mais estabilidade ao circuito.

Com os novos componentes foi possível o uso de apenas uma bateria e um circuito regulador de tensão step-up como fonte de energia, aliviando as restrições impostas pelas dimensões desejadas. O módulo step-up desempenha a função de elevar a tensão da bateria para 5 V, alimentando todo o sistema.

O ESP32, que opera em tensões de até 3,3 V, possui regulador de tensão próprio em sua placa, podendo ser alimentado com tensões de até 15 V em sua entrada “Vin”. Já a tensão negativa de -5 V, crucial para operação do LMC662, é gerada pelo ICL 7660, que atende as demandas de alimentação do amplificador.

Antes da inserção do fotodiodo, o circuito foi avaliado usando a fonte de corrente para analisar seu comportamento. Como atestam os dados expostos no Gráfico 7 e na tabela 10, o circuito teve um comportamento quase que perfeitamente linear, com o coeficiente de correlação de Pearson no valor de 0,9997. Ademais, quanto às leituras realizadas por meio do conversor analógico-digital (ADC), a resposta ficou bastante próxima do valor teórico de 10^9 projetado para o circuito. Quanto aos coeficientes de variação calculados, foram observados índices diminutos, não excedendo o valor de 5%, para cenários onde a magnitude da corrente sendo injetada era praticamente nula.

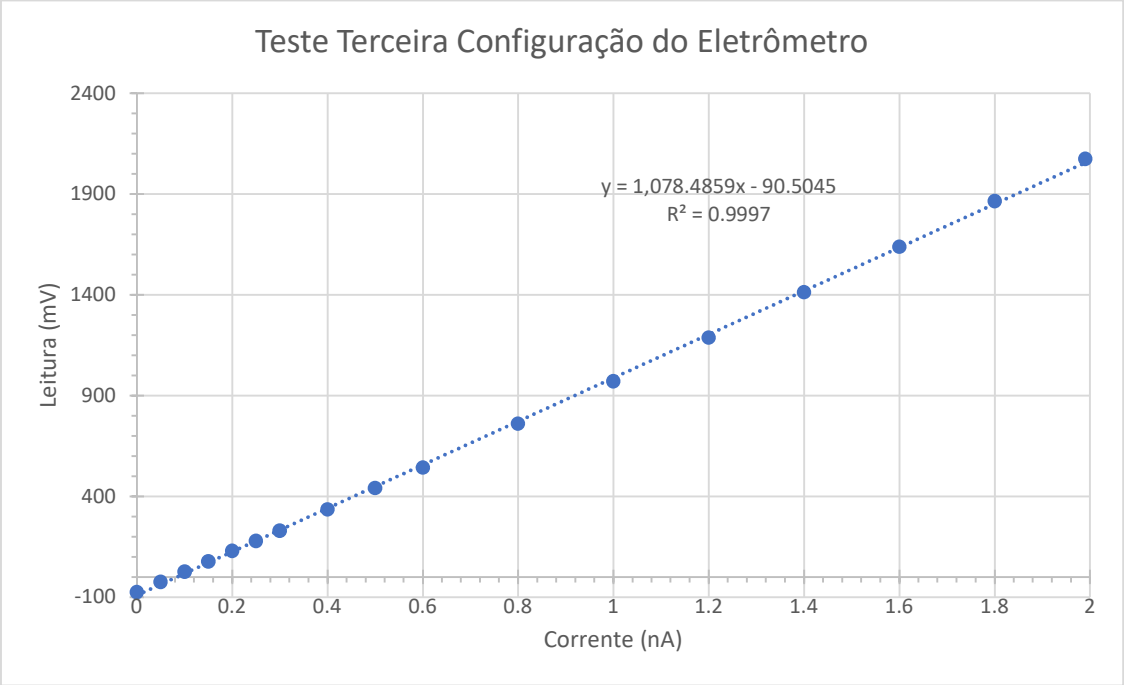


Gráfico 7 – Teste da configuração do eletrômetro sem o uso de cabo acoplado ao ESP-32, com Arduino Cloud (fonte: O autor (2023)).

Tabela 10 – Coeficiente de variação e desvio padrão em cada valor de corrente testado, para o teste da terceira versão do eletrômetro (fonte: O autor (2023)).

Corrente (nA)	DESV.PAD. (mV)	C.V. (%)
0	0,75	1,00
0,05	1,12	4,65
0,10	1,27	4,88
0,15	2,09	2,70
0,20	1,64	1,27
0,25	1,82	1,02
0,30	2,09	0,91
0,40	1,68	0,50
0,50	4,32	0,98
0,60	3,62	0,67
0,80	5,71	0,75
1,00	4,67	0,48
1,20	2,40	0,20
1,40	3,30	0,23
1,60	3,29	0,20
1,80	2,13	0,11
1,99	1,92	0,09

Com a integração do fotodiodo ao circuito, foi observado que a interferência eletromagnética, presente nas configurações previamente apresentadas, deixou de manifestar-se de maneira notável. Tal constatação, assim como os dados acima discutidos, que ilustram o comportamento notável do circuito, justificou a adoção desta configuração como a mais apropriada para dar continuidade ao trabalho.

Como o fotodiodo foi conectado diretamente ao amplificador, se fez necessária sua retirada do encapsulamento original. O circuito já montado foi colocado em um suporte também feito de resina, porém com maiores dimensões para abrigar o circuito de amplificação montado em placa ilhada.

5.2 Caracterização Dosímetro

Após verificar a linearidade e o desempenho consistente do circuito de amplificação, bem como sua comunicação com o circuito de leitura e transmissão de dados, o fotodiodo foi conectado aos terminais do LMC662, conforme mencionado. Seguindo essa etapa os circuitos foram acomodados em seus respectivos encapsulamentos e ligados por um cabo manga e um conector Mike, nas Figuras 27 e 28 são apresentados os diagramas dos dois módulos que compõem o dosímetro, detalhando as interconexões entre os distintos componentes que compõem sua estrutura.

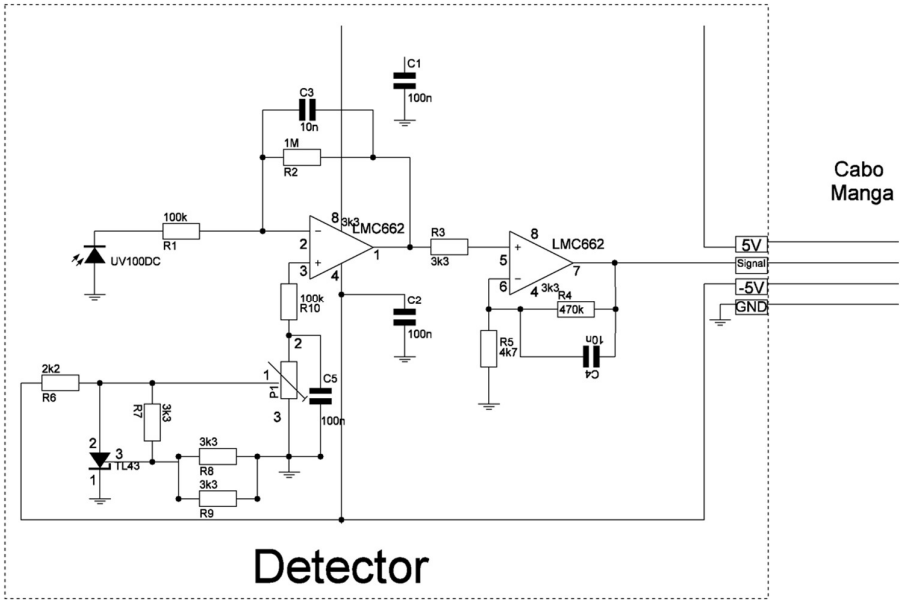


Figura 27 – Esquemática final do módulo detector do dosímetro (fonte: O autor (2023)).

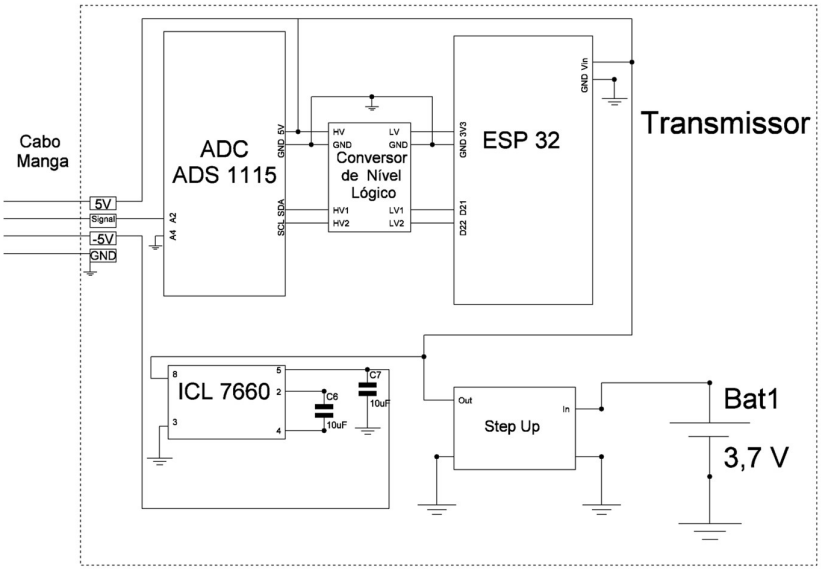


Figura 28 – Esquemática final do módulo transmissor do dosímetro (fonte: O autor (2023)).

Para garantir a estabilidade e integridade física do fotodiodo, além de contribuir como um elemento de salvaguarda adicional contra a entrada de luz indesejada, uma camada de isopor foi posta ao seu redor. O arranjo foi montado de forma que foi acomodado um acesso ao potenciômetro para correção de offset e um espaço para inserção dos filtros de cobre a serem usados. A montagem está ilustrada na Figura 29, onde também pode ser visto um orifício discretamente posicionado na carcaça do dispositivo, situado diretamente acima do potenciômetro em questão. Assim possibilitando a conveniência de ajustes sem necessidade de expor o fotodiodo à luz ambiente, minimizando assim os impactos indesejados. Por fim foi posicionado um adesivo no recipiente acima do fotodiodo, indicando sua posição, auxiliando nos testes de irradiação.

1 2

Figura 29 –Montagem final do sensor do dosímetro. 1- Recipiente aberto mostrando a montagem interna do sensor. 2- Recipiente enclausurado (fonte: O autor (2023)).

Ademais os outros circuitos, presentes na seção marcada como “transmissor” na Figura 25, foram colocados na caixa blindada, junto com a bateria. Como pode ser visto na Figura 30, este circuito está equipado com um interruptor de ativação, proporcionando o controle da energia; uma entrada dedicada ao ESP32, concebida para facilitar eventuais atualizações de código; ademais, é possível observar a presença de um conector Mike de 4 vias, fêmea, para conexão com o sensor.

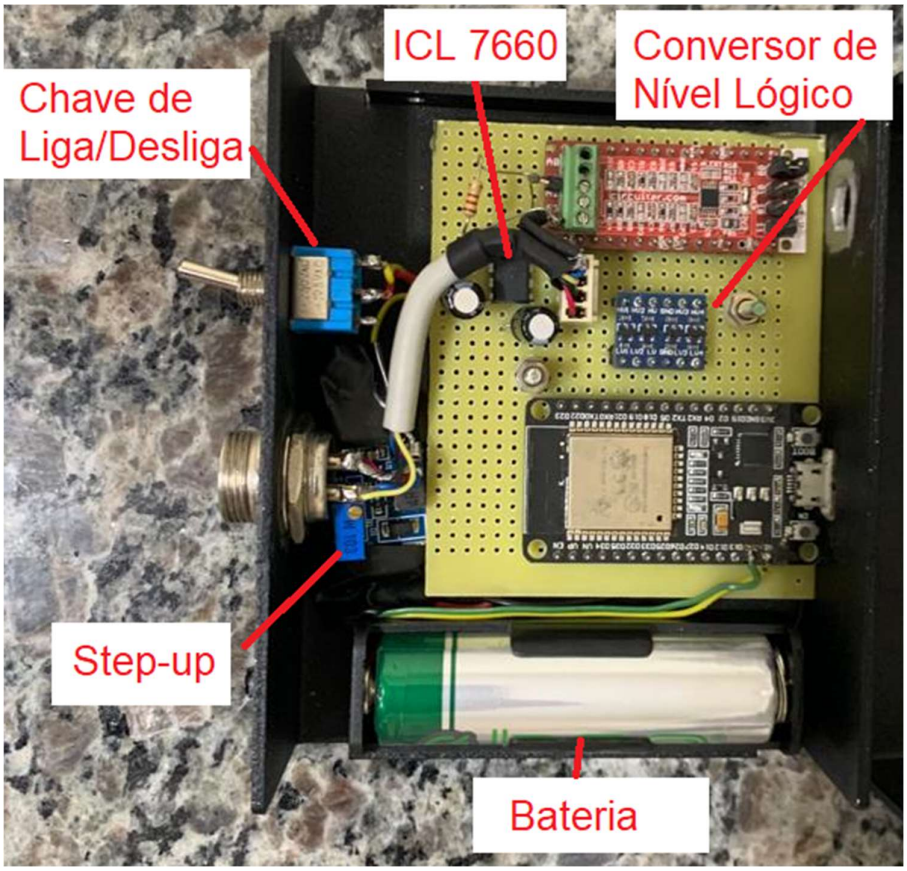


Figura 30 –Montagem final da caixa blindada (fonte: O autor (2023)).

O dosímetro confeccionado foi então levado ao gerador de raios-X para que fossem realizados os testes previstos.

5.2.1 Teste de Dependência Energética

O sensor foi posicionado à frente do gerador de raios X, com auxílio de um suporte de isopor, na Figura 30 é demonstrado como foi realizado o teste. O ESP32 foi então conectado à internet, certificada sua conexão foi dado andamento ao teste.

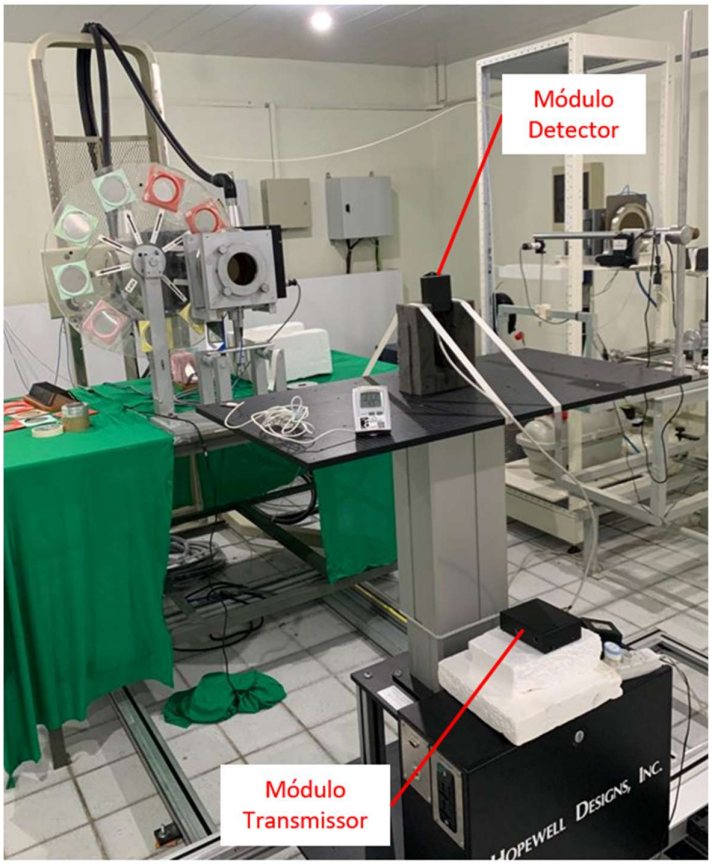


Figura 30 –Posicionamento do sensor para os testes de dependência energética (fonte: O autor (2023)).

Como esperado na ausência de filtro, o dosímetro apresentou uma alta dependência energética. No Gráfico 8 estão expostas as leituras realizadas para cada qualidade de radioproteção, com seus erros do desvio padrão. Como observado o dosímetro apresentou um comportamento consonante com o esperado, reproduzindo resultados congruentes com os padrões de dependência energética encontrados por Costa Filho (2021) em sua pesquisa. Na tabela 11, estão os valores das leituras, assim como os coeficientes de variação para cada medida, como pode ser visto, todos coeficientes ficaram abaixo da margem de 5%, validando a consistência e exatidão das medições.

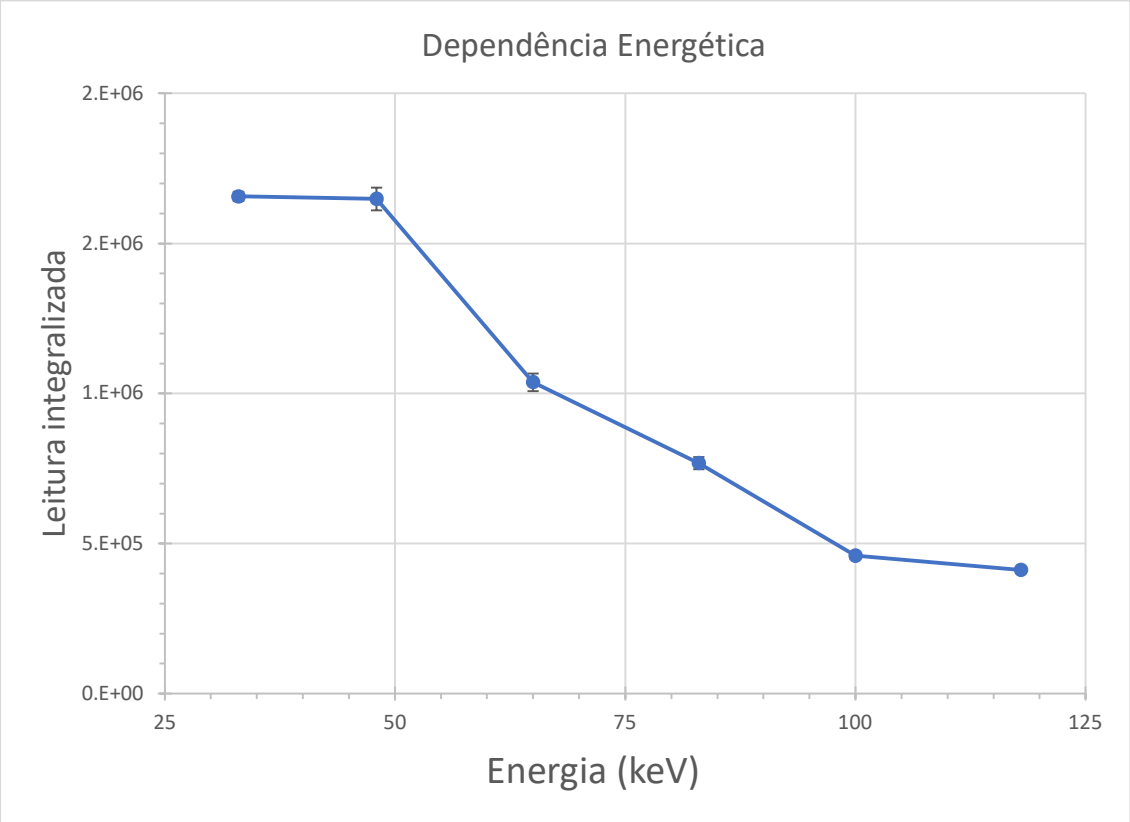


Gráfico 8 – Dependência energética do dosímetro, sem filtro (fonte: O autor (2023)).

Tabela 11 – Coeficiente de variação e desvio padrão para cada qualidade de radioproteção (fonte: O autor (2023)).

ISO N	Leitura	Tempo (ms)	Desvio Padrão	C.V. (%)
N40	2.213.944	33.400	15.850,75	0,72
N60	1.982.029	20.000	37.638,07	1,90
N80	1.726.561	42.100	31.401,30	1,82
N100	1.741.241	58.340	20.493,96	1,18
N120	1.332.894	52.320	12.107,88	0,91
N150	584.897	10.360	5.279,58	0,90

Com os resultados da dependência energética ratificando o comportamento satisfatório do dosímetro, foi dado prosseguimento aos testes subsequentes.

5.2.2 Desempenho dos Filtros

No intuito de atenuar a resposta para baixas energias foi realizada a avalição dos filtros. As camadas de filtros foram posicionadas no dosímetro, à frente do fotodiodo, e foram então repetidas as leituras do teste de dependência energética. Na Figura 31 está ilustrado o arranjo adotado na instalação dos filtros.

Figura 31 – Exemplo de um filtro utilizado e o sensor com 7 camadas de filtro instaladas (fonte: O autor (2023)).

Este estágio defrontou-se com o desafio, como era de se esperar, da excessiva atenuação das qualidades com energia médias mais baixas, especialmente a ISO N40. Como evidenciado pelo gráfico 9, as respostas obtidas nessa qualidade ficaram significativamente aquém das demais. Analisando os resultados foi observado que a espessura de 8 camadas apresentou uma notável redução na dependência energética, especialmente para as qualidades de radioproteção testadas a partir da N80.

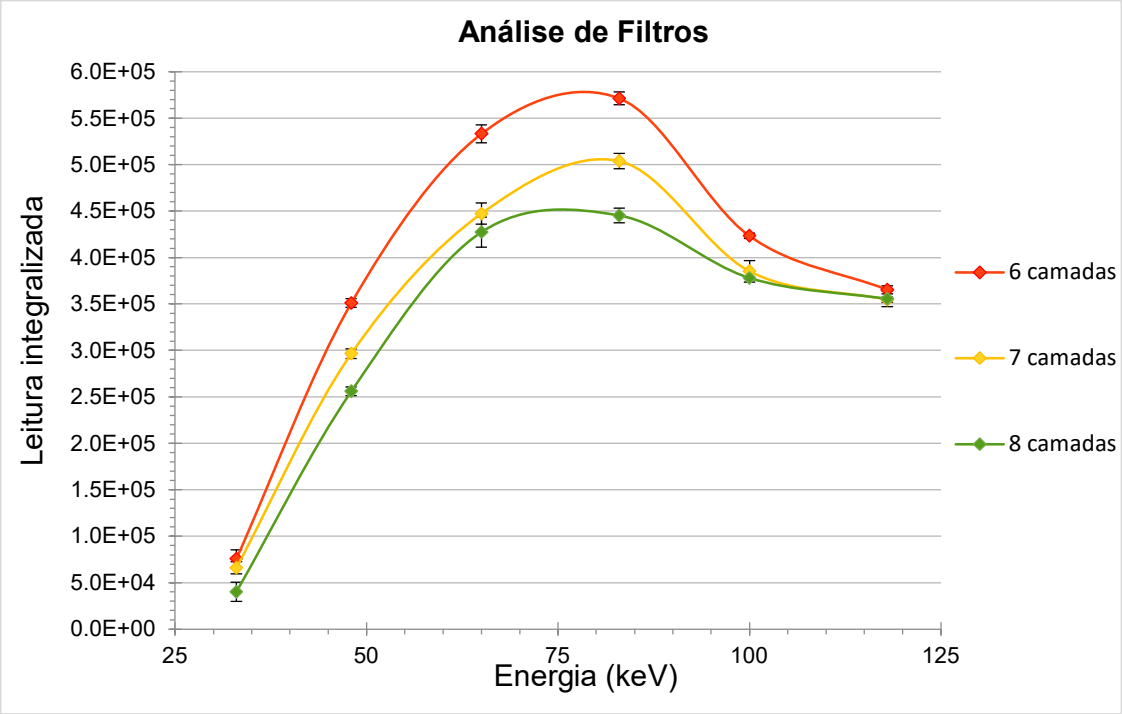


Gráfico 9 – Dependência energética do dosímetro, para diferentes espessuras de filtro (fonte: O autor (2023)).

A Tabela 12 apresenta a dependência energética encontrada para cada espessura do filtro examinada para as diferentes qualidades de radioproteção. Como mencionado previamente, a configuração com 8 camadas de filtros apresentou os melhores resultados, apesar da maior atenuação das qualidades com energias médias de menor magnitude. Tanto para qualidades acima da N60 como N80 essa espessura apresentou a menor dependência energética, dentre as configurações testadas. No entanto, todas configurações apresentaram uma dependência energética superior àquela encontrada em dosímetros comerciais, para ambas N40 e N60, com destaque para variação na leitura da N40. Os valores dos coeficientes de variação no decorrer desses testes não ficaram acima de 5%, sendo o maior valor observado de 4,88%.

Tabela 12 – Dependência energética para diferentes conjuntos de Qualidades de radioproteção (fonte: O autor (2023)).

Espessura	N40 a N150	N60 a N150	N80 a N150
0 camadas	<66%	<92%	<54%
6 Camadas	<82%	<67%	<24%
7 Camadas	<80%	<42%	<20%
8 Camadas	<88%	<37%	<12%

5.2.3 Linearidade

Após expor o dosímetro a doses que escalaram linearmente para cada qualidade, suas leituras e desvio padrão foram então utilizados para elaborar o Gráfico 10, onde foram traçadas as curvas de calibração. E como pode ser visto as curvas obtidas foram quase perfeitamente lineares. Ademais ambas apresentaram coeficientes angulares muito próximos, corroborando para a baixa dependência energética para as qualidades de radioproteção testadas, após aplicação de filtros

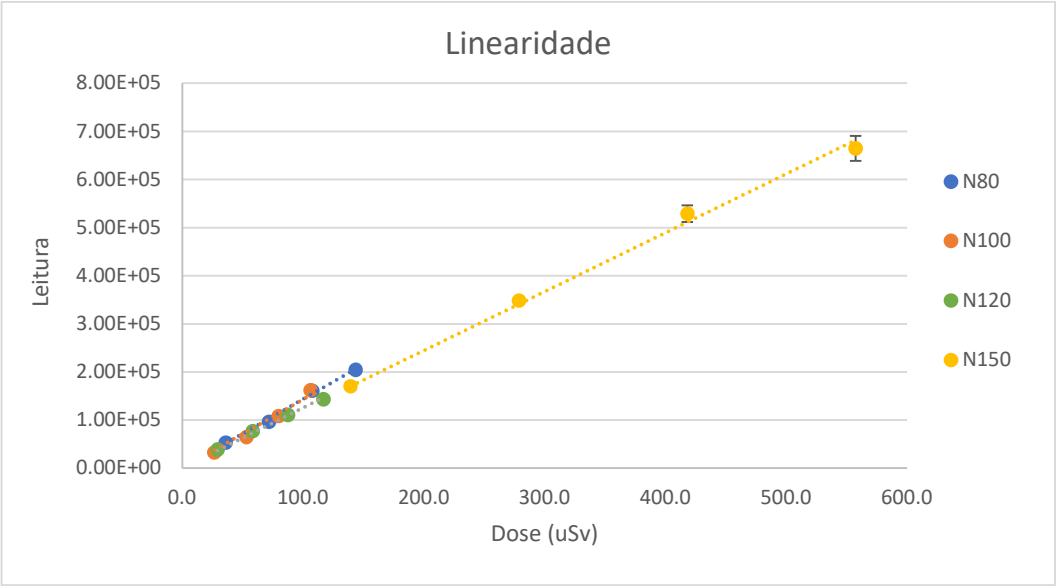


Gráfico 10 – Curvas de Calibração para diferentes qualidades de radioproteção (fonte: O autor (2023)).

Na tabela 13 estão em exposição os valores dos coeficientes angulares encontrados, assim como R^2 e o maior coeficiente de variação para cada qualidade avaliada. Os resultados evidenciam o bom comportamento do dosímetro, uma vez que todos os valores de R^2 se aproximaram da unidade, sendo o menor valor encontrado igual a 0,9935. Ademais, os coeficientes de variação permaneceram abaixo de 5%, contribuindo para repetibilidade do dosímetro.

Tabela 13 – Coeficientes angulares, de correlação de Pearson e de Variação no teste de linearidade para as diferentes qualidades de radioproteção (fonte: O autor (2023)).

Qualidades	Coeficiente Angular	R^2	Coeficiente de Variação (%)
N80	1436,80	0,9990	1,74
N100	1428,50	0,9935	4,75
N120	1257,50	0,9992	4,04
N150	1222,90	0,9992	4,53

5.2.4 Dependência angular

Nesta etapa as leituras observadas foram normalizadas, usando a leitura sem variação angular como referência, e estão dispostas com seus erros do desvio padrão no gráfico 11. A variação no ângulo pouco afetou a resposta até 60º. No entanto, além desse ponto há uma queda mais acentuada na leitura. O uso de filtros não aparentou alterar a dependência angular, com o dosímetro apresentado resultados congruentes ao encontrado por Costa Filho (2021), na sua caracterização do fotodiodo UV100DC. O comportamento observado contrasta favoravelmente com outros dosímetros, como o desenvolvido por Yamaguchi et al. (2019), onde a queda na resposta após os 60 graus se dá em um ritmo ainda mais acentuado, resultando em valores inferiores a metade do valor observado sem variação angular. Novamente os valores dos coeficientes de variação se mantiveram abaixo de 5%, onde o maior valor observado foi de 3,04%.

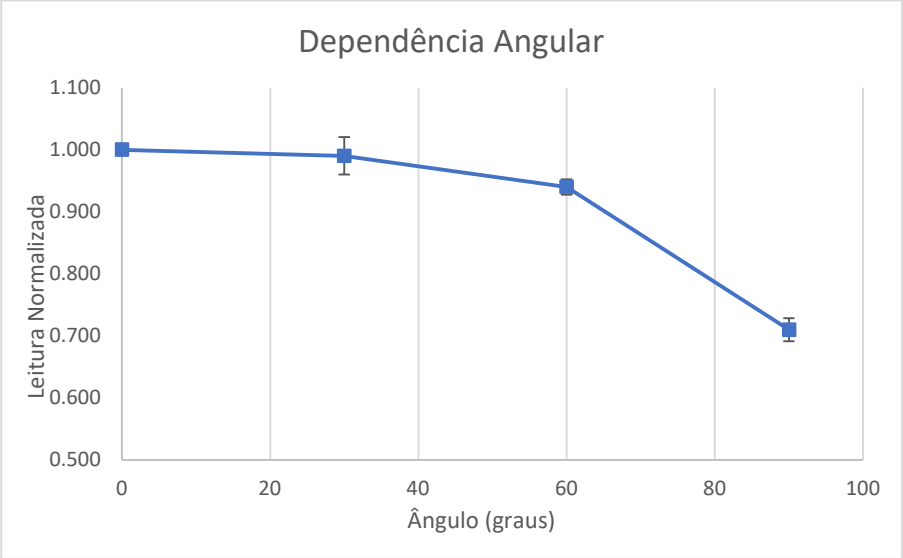


Gráfico 11 – Gráfico da dependência angular (fonte: O autor (2023)).

5.2.5 Repetibilidade e Reprodutibilidade

Por fim foram analisadas a repetibilidade e reprodutibilidade do dosímetro. O dosímetro atendeu os critérios de repetibilidade, como pode ser visto pelos coeficientes de variação compartilhados no decorrer desse trabalho, onde todos permaneceram abaixo de 5%. Quanto a reprodutibilidade, os valores, com seus erros do desvio padrão, também ficaram dentro dos padrões estabelecidos, como pode ser visto no Gráfico 12 onde as leituras dos 3 dias se mantiveram em uma variação menor que ±10%.

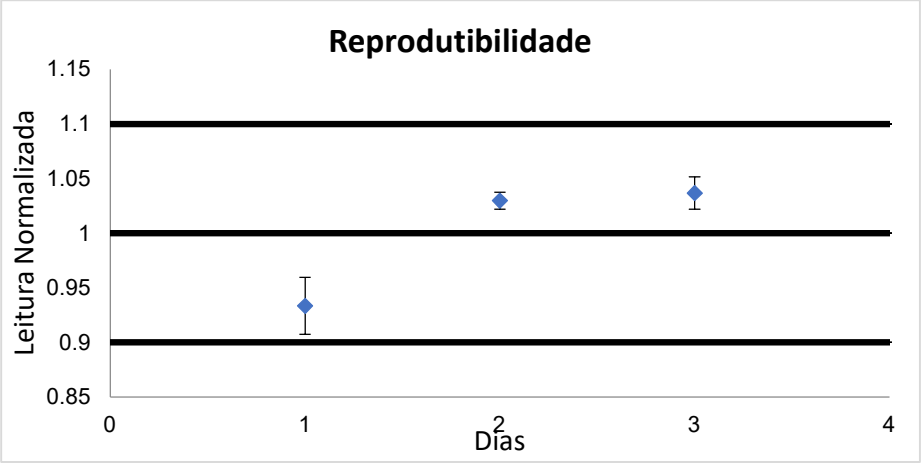


Gráfico 12 – Gráfico da reprodutibilidade (fonte: O autor (2023)).

6 CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS FUTURAS

Neste trabalho foi elaborado um dosímetro portátil de leitura direta, com o uso de fotodiodo, para uso em radiologia. O desenvolvimento foi realizado no Laboratório de Metrologia das Radiações Ionizantes (LMRI) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Dando continuidade ao trabalho desenvolvido por Costa Filho (2021).

De início foi realizada uma revisão bibliográfica que resultou na elaboração de três diferentes configurações para a unidade eletrométrica, onde todas foram devidamente testadas. A análise dessas configurações convergiu para a conclusão de que o uso de cabos para conectar o fotodiodo ao circuito de amplificação acarretava em interferências substanciais no circuito, justificando a opção pela terceira configuração desenvolvida, onde o fotodiodo foi soldado diretamente ao circuito, minimizando tais interferências.

A questão da portabilidade do dosímetro foi resolvida mediante a implementação de baterias de lítio e circuitos de step-up, garantindo o fornecimento eficiente da energia para sua operação. O microcontrolador ESP32 acoplado ao módulo ADC, ADS1115, capacitou o dosímetro para realizar leituras precisas e transmitir, através de conexão Wi-Fi, as informações, amplificadas e coletadas, produzidas pelo fotodiodo ao ser exposto às radiações ionizantes.

Por fim a caracterização do dosímetro foi realizada fazendo uso do gerador de raios X presente no laboratório. Para isso foram utilizadas as qualidades de radioproteção estabelecidas pela norma ISO 4037, sendo elas a N40, N60, N80, N100, N120 e N150. A análise concentrou-se na dependência energética e sua mitigação através do uso de diferentes espessuras de filtro. A dependência angular, linearidade, repetibilidade e reprodutibilidade, também foram avaliadas.

Os resultados revelaram a notável eficácia dos filtros utilizados na redução da dependência energética, especialmente para qualidades de energia média superior a N80. Entretanto, vale ressaltar que, para qualidades com energias médias do feixe mais baixas, o uso de filtros resultou em um efeito inverso, onde as leituras acabaram ficando abaixo dos valores encontrados para as demais qualidades, ficando acima dos níveis praticados comercialmente para dependência energética. A análise dos dados sugere que o uso de mais camadas de filtros poderia melhorar ainda mais o cenário de dependência energética a partir da qualidade N80, já que as qualidades

N120 e N150 aparentaram uma menor redução na resposta, possibilitando aproximar as respostas das qualidades N80 e N100. Para buscar encontrar um balanço mais adequado na filtragem, podem ser empregados filtros de alumínio, como os utilizados por Silva (1992). Outra possibilidade é o uso de um segundo sensor fotodiodo sem filtros, como utilizado por Fujibuchi et al. (2019). O sistema de leitura já está equipado para realizar leituras em mais de um canal, e as respostas dos dois sensores pode ser comparada em software para discernir a energia do feixe de radiação, aplicando o fator de correção necessário na leitura, assim solucionando o problema de dependência energética.

Quanto às demais características analisadas para o equivalente de dose pessoal Hp (10), todas se mantiveram dentro de limites aceitáveis, com destaque para a dependência angular. A queda na leitura observada se deu de maneira mais acentuada apenas a partir dos 60 graus, em um grau menor que aquelas observadas no dosímetro desenvolvido por Yamaguchi et al. (2021) e até abaixo das quedas observadas nos dosímetros comerciais testados por Krzanovic *et al.* (2021). Ambas repetibilidade e reprodutibilidade se mantiveram dentro dos padrões estabelecidos, atestando a consistência e confiabilidade do dosímetro. Por fim, o dosímetro mostrou um comportamento linear para a variação da dose de radiação, com o menor coeficiente de correlação de Pearson (R^2) sendo de 0,9935.

O dosímetro, devido à sua capacidade de transmitir dados em tempo real pela internet de maneira confiável e robusta, fazendo uso de componentes de baixo custo, destaca-se como uma inovação significativo no campo, onde a maioria dos modelos encontrados utiliza comunicação via rádio ou Bluetooth. No entanto, desafios relacionados à dependência energética precisam ser abordados em pesquisas futuras, com as soluções viáveis elucidadas anteriormente.

A continuidade do desenvolvimento do dosímetro será assegurada no mesmo laboratório, o LMRI, que possui não apenas o pessoal capacitado, mas também as ferramentas necessárias para prosseguir com esta pesquisa. Para o futuro, espera-se otimizar ainda mais o dispositivo, reduzindo as dimensões dos circuitos com o uso de placas de circuito impresso, assim como o uso de componentes “standalone” do microcontrolador e do módulo ADC, além da elaboração de um sistema para o armazenamento e tratamento automático dos dados em um servidor seguro acessível por dispositivos conectados à internet. Por fim, também é esperado que haja um aperfeiçoamento na metodologia de caracterização do dosímetro para que seu

comportamento seja avaliado conforme ditam as normas regulamentadoras, especialmente a IEC 61526.

AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores, Dra. Viviane Khoury Asfora e Dr. Charles Nilton Prado de Oliveira, expresso minha profunda gratidão pelas preciosas instruções, paciência e inestimável auxílio ao longo desta jornada acadêmica.

À comunidade de alunos e funcionários do Laboratório de Metrologia das Radiações Ionizantes, agradeço pelo caloroso acolhimento, pelas inestimáveis contribuições especializadas e pela sincera amizade que tornaram esta jornada significativamente mais enriquecedora.

Aos meus pais, André Luís Peixoto e Vasconcelos, e Christianne Soares Falcão, juntamente com os demais familiares, expresso minha profunda gratidão por fornecerem a sólida estrutura e o apoio inabalável que foram fundamentais para concluir esta etapa vital em minha vida.

Por fim, à minha querida esposa, Ana Carolina de Carvalho Leandro, agradeço do fundo do meu coração por sua constante motivação, e por ser minha companheira incansável em todos os momentos desta jornada. Suas palavras de encorajamento e amor foram o alicerce de minha determinação.

REFERÊNCIAS

BUENO, C. C., Camargo, F., & Gonçalves. A comparison between rad-hard float zone silicon diodes as gamma dosimeter in radiation processing. **Brazilian Journal of Radiation Sciences**, v. 7(2A (Suppl.), fev 2019.

CNEN – COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Diretrizes básicas de proteção radiológica**. CNEN-NN-3.01. CNEN, Rio de Janeiro, 2005. Resolução CNEN 164/2014 (Alteração do item 5.4.3.1). Publicação DOU em 11.03.2014.

COSTA FILHO, José Rafael Vieira. **Caracterização de Detectores Fotodiodos para Dosimetria de Radiações Ionizantes**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Energia) – Universidade Federal de Pernambuco. Recife, p. 57. 2021.

DATASHEET ICL 7660. **Renesas,** c2010. Disponível em: https://www.renesas.com/br/en/document/dst/icl7660-datasheet. Acesso em: 06 de set. de 2023

DATASHEET PM1300. **Polimaster**. Disponível em: https://www.radiansa.com/datasheets/PM1300_datasheet.pdf. Acesso em: 06 de set. de 2023.

DATASHEET RAD-60/62. **Mirion Technologies**, c2020. Disponível em: https://mirionprodstorage.blob.core.windows.net/prod-20220822/cms4_mirion/files/pdf/spec-sheets/20996597_rad60_62_en_b.pdf. Acesso em: 06 de set. de 2023.

FUJIBUCHI, Toshioh; Inoue, Airi; ISHIGAKI, Yang; MATSUMOTO, Yoshinori. Development of a wireless multisensor active personal dosimeter–tablet system. **Progress in Nuclear Science and Technology**, v. 6, P. 73-76, 2019.

IEC – INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **Radiation protection instrumentation - Measurement of personal dose equivalents Hp(10) and Hp(0,07) for X, gamma, neutron and beta radiations - Direct reading personal dose equivalent meters**. IEC 61526, 2010.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results. Part 1: general principles and definitions**. ISO 5725-1, 1994.

ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy. Part 3: calibration of area and personal dosimeters and the measurement of their response as a function of energy and angle of incidence**. ISO 4037, 1999.

KARMAKAR, Arijit *et al.* A Review of Semiconductor Based Ionising Radiation Sensors Used in Harsh Radiation Environments and Their Applications. **Radiation.** v. 1, p. 194-217, ago. 2021.

KHOURY, Helen J. *et al*. Evaluation of commercial silicon diode for electron dosimetry. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, v. 580, e. 1, p. 537-539, set. 2007.

KRZANOVIC, Nikola *et al.* Performance testing of dosimeters used in interventional radiology: Results from the VERIDIC project. **Radiation Measurements.** v. 141, 106515, fev. 2021.

LEAFLET RaySafe i3. **RaySafe**, c2017. Disponível em: https://www.raysafe.com/sites/default/files/2019-01/5200121-1.3_RaySafe_i3_PDM2_leaflet_EN_web.pdf. Acesso em: 06 de set. de 2023.

MELO, F. A. **Desenvolvimento de um dosímetro para radiação gama utilizando fotodiodo**. 1988. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Energéticas e Nucleares) – Universidade Federal de Pernambuco, 1988.

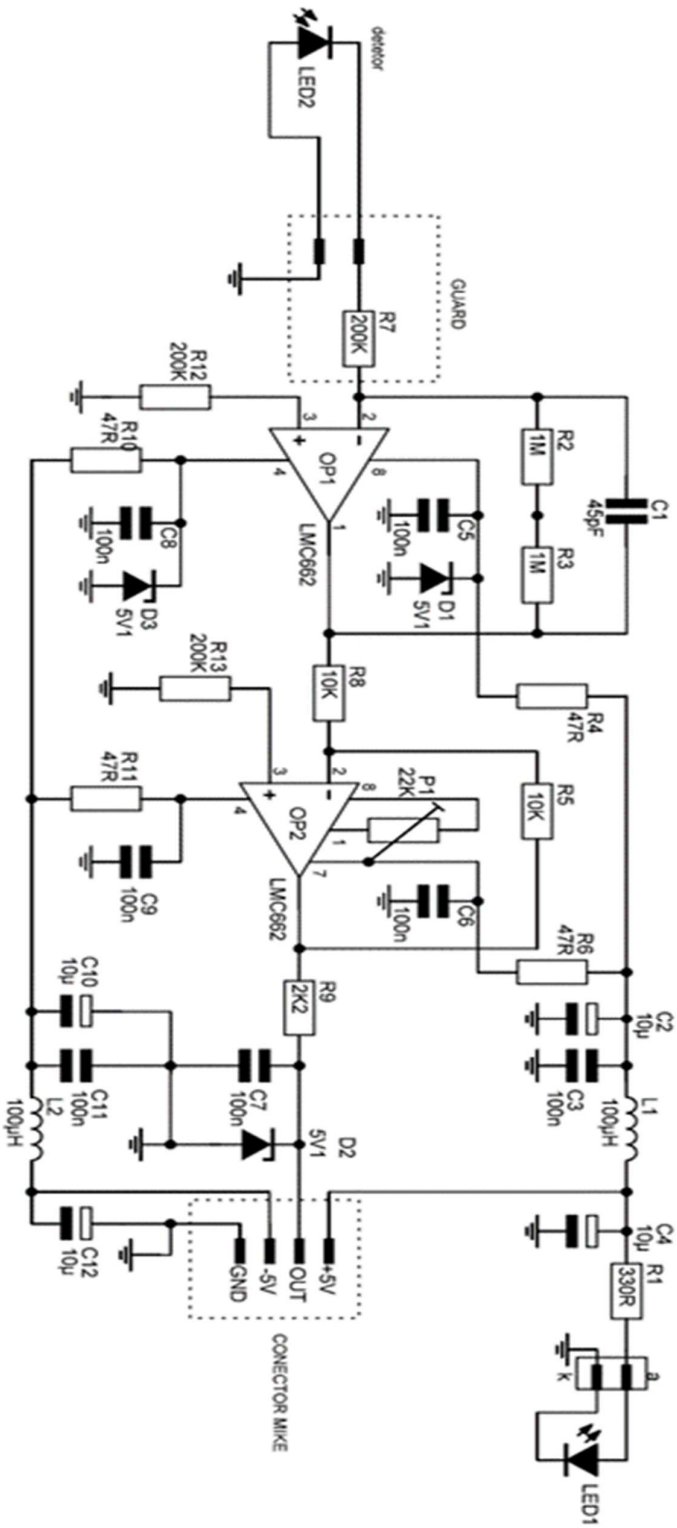
NAKAJIMA, Erika; YAMASHITA, Hiromi; SATO, Hitoshi. Characteristic evaluation of a simple hand-made semiconductor dosimeter for mammography. **Journal of Radiological Protection,** v. 41, p. 1018-1033, nov. 2021.

OLIVEIRA, Charles N.P.; KHOURY, Helen J.; SANTOS, Edval J.P. PiN photodiode performance comparison for dosimetry in radiology applications. **Physica Medica,** v. 32, e. 12, p. 1495-1501, dez. 2016.

OLIVEIRA, Charles Nilton Do Prado. **Sistema Dosimétrico Portátil sem fio para uso em Radiologia**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Biomédica) – Universidade Federal de Pernambuco. Recife, p. 181. 2015.

ROSENFELD, Anatoly B. *et al*. Semiconductor dosimetry in modern external beam radiation therapy. **Physics in Medicine & Biology**. v. 65 16TR01, ago. 2020.

SILVA, M. C. **Caracterização e otimização de um detector para raio-X a base de semicondutor**. 1992. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Nuclear e Planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1992.

YAMAGUCHI, Satoshi; SATO, Eiichi; IEKO, Yoshiro; ARIGA, Hisanori; YOSHIOKA, Kunihiro. Development of a dose-rate dosimeter for x-ray CT scanner using silicon x-ray diode. **Review of Scientific Instruments,** v. 92, mai 2021.

ANEXO A – ESQUEMA DO CIRCUITO UTILIZADO NO MODO DE OPERAÇÃO PADRÃO COM USO DE CABO BIAXIAL