

## **Desenvolvimento de detector portátil de radiação usando simultaneamente fotodiodo de silício para raios-x e cintilador com fotodiodo para raios gama**

### **Development of a portable radiation detector using simultaneous silicon photodiode for x-rays and scintillator with photodiode for gamma rays**

DOI:10.34117/bjdv7n9-315

Recebimento dos originais: 07/08/2021

Aceitação para publicação: 20/09/2021

#### **Samuel Amorim Canazza**

Eng. Eletricista

SENAI – Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial – SP

Rua Monsenhor Andrade 298 - São Paulo - SP

E-mail: samuel.canazza@gmail.com

#### **Silas Alexandre Gonçalves**

Eng. Eletricista

SENAI – Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial – SP

Rua Monsenhor Andrade 298 - São Paulo - SP

E-mail: silasag@gmail.com

#### **Fabio Eduardo da Costa**

Dr. em Ciências-Tecnologia Nuclear

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN - CNEN

Av. Professor Lineu Prestes 2242 - São Paulo - SP

E-mail: fecosta@ipen.br

#### **Margarida Mizue Hamada**

Dra. em Ciências-Tecnologia Nuclear

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN - CNEN

Av. Professor Lineu Prestes 2242 - São Paulo - SP

E-mail: mmhamada@ipen.br

#### **RESUMO**

Neste trabalho foi desenvolvido um detector portátil de radiação usando como meio detector um fotodiodo de silício para raios-X e um cintilador de CsI(Tl) com fotodiodo para radiação gama. A configuração dos detectores foi estudada utilizando fotodiodos em paralelo com um único pré-amplificador e com pré-amplificadores em paralelo, buscando o menor ruído do conjunto e com isso aumentar a faixa de energias detectadas.

**Palavras chave:** detectores de radiação, fotodiodos de silício, cintilador CsI(Tl).

## ABSTRACT

In this work, a portable radiation detector was developed using a silicon photodiode for X-rays and a CsI(Tl) scintillator with a photodiode for gamma radiation as detector medium. The configuration of the detectors was studied using photodiodes in parallel with a single pre-amplifier and with pre-amplifiers in parallel, seeking the lowest noise to increase the range of detected energies.

**Key-words:** radiation detectors, silicon photodiodes, CsI(Tl) scintillator.

## 1 INTRODUÇÃO

As tecnologias que utilizam radiação ionizante exigem atualmente detectores compactos e de baixo custo. Para essas aplicações, onde não são necessários obter os espectros de energia, geralmente são usados detectores com tubos Geiger-Müller. As características destes detectores são conhecidas como baixa sensibilidade, principalmente para detectores de volumes reduzidos e baixas taxas de contagem. Uma das alternativas para substituir os Geiger-Müller são os fotodiodos PIN de silício. Estes fotodiodos têm alta sensibilidade à luz visível e radiação infravermelha, mas também são capazes de detectar raios-X e radiação gama de baixa energia [1].

O fotodiodo PIN é uma variação do diodo de junção PN, mas que possui uma região intrínseca entre a junção P e N. Esta configuração aumenta o volume da junção e consequentemente a eficiência como detector. Diante destas características, atualmente várias empresas fabricantes de detectores portáteis de radiação utilizam estes fotodiodos [2, 3]. Paralelamente, para aumentar a eficiência de detecção para radiações com energias maiores que as dos raios-X, tem-se usado fotodiodos de silício acoplados a cristais cintiladores de CsI(Tl) [3]. Estes cristais podem ser fabricados em vários volumes, apresentam elevado número atômico e sua luminescência está em uma faixa sensível dos fotodiodos.

Neste trabalho além da construção de todo o conjunto eletrônico desde o sinal do detector até a unidade de contagens, foi estudada a configuração que apresentasse o menor ruído. O fotodiodo de silício é sensível a energias desde algumas unidades de keV, mas o ruído de todo o conjunto pode se misturar a estes valores e não permitir sua detecção. Assim, construir um conjunto detector com o menor ruído possível implica em aumentar a faixa de energias que é sensível.

Em um conjunto detector utilizando semicondutores o ruído presente no sinal detectado é uma somatória da corrente de fuga no detector, dos componentes eletrônicos que compõe o sistema e ainda um ruído devido a capacitância do detector [4, 5]. Este

último é produzido pelo pré-amplificador sensível à carga que é o mais indicado para usar com detectores semicondutores [1]. Este tipo de pré-amplificador apresenta alta estabilidade pois a conversão da carga produzida no detector em tensão só depende do valor do capacitor de realimentação. Apesar desta vantagem, estes pré-amplificadores produzem um ruído proporcional a capacitância de entrada (capacitância do detector) exigindo, portanto, que o detector tenha a menor capacitância possível. Devido a esta característica, foram comparados os comportamentos dos conjunto pré-amplificador utilizando dois fotodiodos em paralelo, que neste caso teriam as capacitâncias somadas, com um único pré-amplificador e fotodiodos e pré-amplificadores independentes, mas com suas saídas paralelo, que somariam os ruídos dos conjuntos, buscando a configuração que apresentasse menor ruído.

Na sequência ainda foram estudados os circuitos de polarização de tensão reversa para os fotodiodos e da fonte de tensão negativa para os amplificadores operacionais utilizados no conjunto detector. Estes circuitos apesar de serem convencionais não podem ser utilizados indiscriminadamente devido ao elevado ruído que podem introduzir no circuito pré-amplificador comprometendo a detecção em baixas energias.

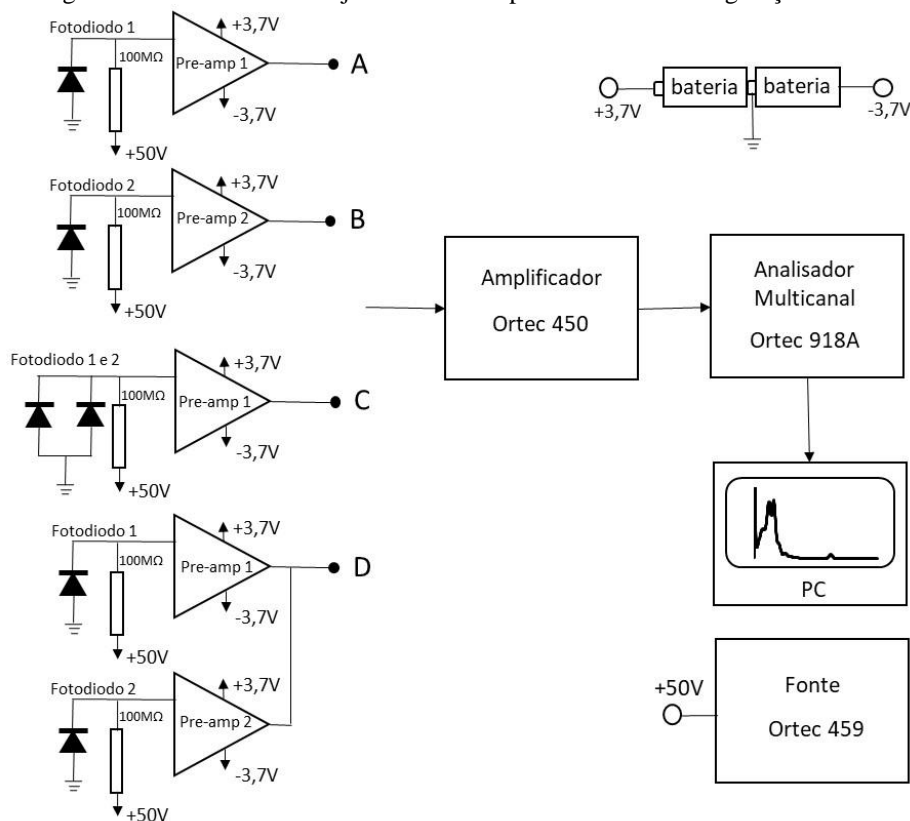
## 2 MATERIAL E MÉTODOS

Inicialmente foram construídos dois pré-amplificadores idênticos, segundo o circuito de Fagionato [5], com o fotodiodo acoplado a um transistor de efeito de campo modelo 2SK152 e este a um amplificador operacional AD8011AN. Os fotodiodos tipo PIN utilizados foram o S5106 da Hamamatsu com 25 mm<sup>2</sup> de área [6]. Nos testes de seleção do conjunto, para garantir que não havia ruído gerado pela fonte de tensão simétrica para o amplificador operacional foram utilizados dois conjuntos de baterias para fornecer a tensão positiva e negativa. Para a fonte de tensão reversa para os fotodiodos foi utilizada a fonte de alta tensão Ortec 459 Bias Supply e para a amplificação do sinal do pré-amplificador o Ortec 450 Research Amplifier. O nível de ruído e o limiar de energia detectado em cada configuração foi observado por meio dos espectros de energia obtidos com um analisador multicanal Ortec 918A Multichannel Analyzer. A fonte radioativa utilizada para se obter os espectros foi o <sup>241</sup>Am, selada em plástico, que emite os raio-X característicos de 13,9 keV e 17,7 keV e o gama de 59,6 keV.

Na Figura 1 é mostrado os arranjos em blocos dos conjuntos construídos para estudo da configuração com menor ruído. Primeiramente as unidades idênticas, A e B, pré-amplificadores e fotodiodos na configuração convencional para avaliar se o

comportamento dos circuitos construídos estavam semelhantes. Em C, fotodiodos em paralelo, com um único pré-amplificador e em D os dois pré-amplificadores em paralelo, com seus respectivos fotodiodos. Nestes testes ainda não estava acoplado o cintilador ao fotodiodo pois para avaliação do ruído só são interessantes as detecções em baixas energias.

Figura 1: Diagrama de blocos dos arranjos construídos para estudo da configuração com menor ruído.



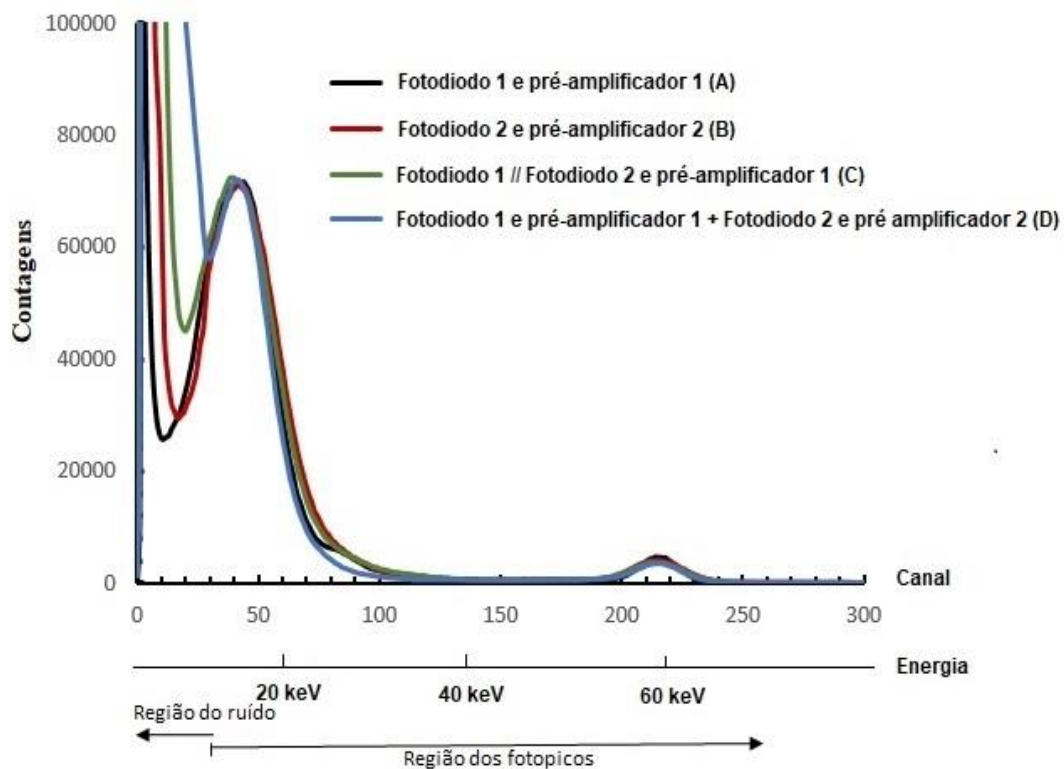
Definido o conjunto detector a ser utilizado, foram testados os circuitos integrados inversores de tensão MC33063A e o ICL7660 que possuem técnicas distintas para geração da tensão negativa a partir de uma única bateria e o comportamento quanto ao ruído produzido no pré-amplificador. Por último definiu-se o circuito multiplicador de tensão para a polarização reversa dos fotodiodos, também buscando o que produzisse menor ruído.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 2 são mostrados os espectros de energia do  $^{241}\text{Am}$  na sua região do raio-X característicos e da emissão gama em 59,6 keV para as configurações de detectores testadas. O espectro em preto foi obtido com o pré-amplificador A e o vermelho com o

B, onde foram utilizados fotodiodos e pré-amplificadores idênticos nos arranjos com a finalidade de observar se o comportamento seria similar. O espectro em verde, C, foi obtido com os dois fotodiodos ligados em paralelo com um único pré-amplificador e o espectro em azul, D, com as saídas dos dois pré-amplificadores em paralelo e com seus respectivos fotodiodos.

Figura 2: Espectros de energia obtidos com uma fonte de  $^{241}\text{Am}$  para as configurações testadas de fotodiodos e pré-amplificadores. As legendas A,B,C e D na figura referem-se as saídas de sinal mostradas na Figura 1.



O espectro em preto, saída A, e o em vermelho, saída B, mostrados na Figura 2 mostraram que o comportamento foi semelhante dos conjuntos onde, em ambos, o ruído obtido com o circuito pré-amplificador utilizado não permite a individualização dos dois fotopicos de raio-X característico do  $^{241}\text{Am}$  em 13,9 keV e 17,8 keV. Estes dois fotopicos aparecem apenas como um, mas demonstram que o ruído presente na saída do pré-amplificador utilizado não compromete substancialmente a detecção de energias tão baixas quanto 13,9 keV.

Com os pré-amplificadores testados e apresentando comportamento semelhantes foram obtidos os espectros em verde, saída C, para fotodiodos ligados em paralelo, e em azul, saída D, pré-amplificadores em paralelo. A comparação dos espectros C e D, contidos na Figura 2, mostra que o vale formado entre a região de ruído e o fotopico do

raio-X para o espectro C, obtido com dois fotodiodos em paralelo, apresenta menor amplitude e, portanto, menor ruído que o espectro D, para pré-amplificadores em paralelo. Como pode ser observado pela comparação dos espectros, apesar do uso dos dois fotodiodos em paralelo apresentarem mais ruído que conjuntos detectores individuais, essa configuração ainda foi mais vantajosa que usar pré-amplificadores separados e desta forma foi o circuito utilizado. Deve ficar claro que este é um resultado para os pré-amplificadores e fotodiodos utilizados neste trabalho e que talvez não seja verdade para outros fotodiodos e pré-amplificadores.

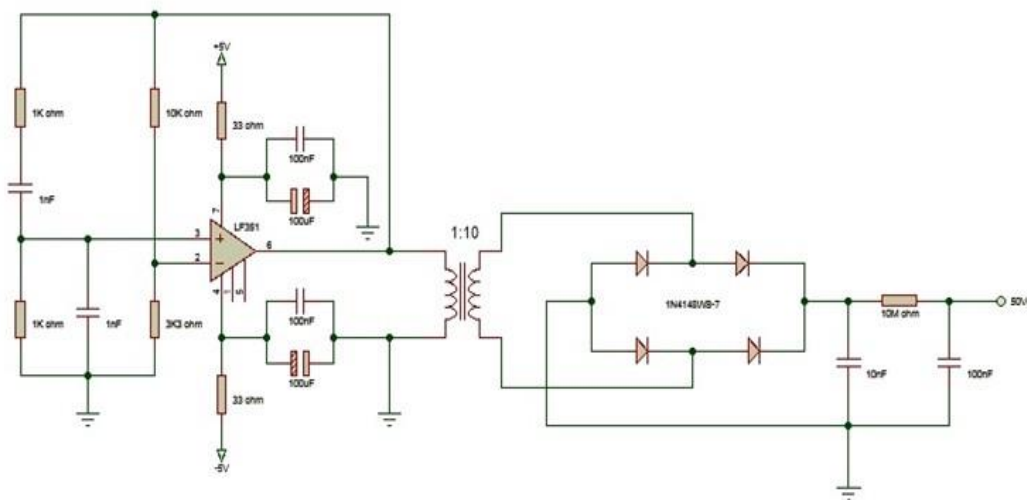
Como neste trabalho foram usados amplificadores operacionais que necessitam de uma tensão simétrica para o correto funcionamento destes componentes e os arranjos convencionais de baterias só fornecem tensão positiva ou negativa, foram utilizados componentes inversores de tensão. O mercado de componentes eletrônicos fornece uma variedade de componentes que podem a partir de uma tensão positiva produzir uma tensão negativa. Apesar destes circuitos serem circuitos convencionais e encontrados em muitos equipamentos eletrônicos (computadores, multímetros, sensores de temperatura entre outros), para os níveis de ruído desejados, eles se constituíram em um problema. Um dos circuitos testados para obtenção da tensão negativa utilizou o circuito integrado MC33063A como inversor regulador chaveado com armazenagem de energia com indutor. Apesar de sua elevada eficiência de conversão, mesmo utilizando filtros resistor-capacitor ou indutor-capacitor em série com a sua saída de tensão negativa não foi possível a supressão total dos espúrios que apareciam em baixas energias no sinal do pré-amplificador. Como este circuito opera chaveando um indutor e este torna-se responsável pelos sinais espúrios em baixas energias, foi testado o circuito integrado ICL7660 que utiliza a armazenagem de energia em um capacitor. Este circuito produziu espúrios da ordem de 7 keV que não comprometeram sensivelmente a detecção em baixas energias e, portanto, foi o utilizado. Este valor foi estimado, pois existe muito ruído nesta faixa de energia com o conjunto detector utilizado. Apenas a título de comparação foi experimentado também um regulador linear LM7905 para tensão negativa. Apesar deste circuito não ter introduzido qualquer ruído, ele exige que se tenha dois conjuntos de baterias, um para tensão positiva e outro para tensão negativa, o que eleva o volume e custo da unidade. A Tabela 1 mostra os ruídos produzidos na unidade pré-amplificadora por um regulador linear e por duas tecnologias de inversores.

Tabela 1- Comparação entre os ruídos produzidos no pré-amplificador com regulador linear e com reguladores inversores.

Regulador	Tecnologia utilizada	Ruído observado na saída do pré-amplificador (keV)
LM7905	Regulação linear	Não observado
MC33063A	Armazenagem de tensão em indutor	25, 40 e 80
ICL7660	Armazenagem de tensão em capacitor	7

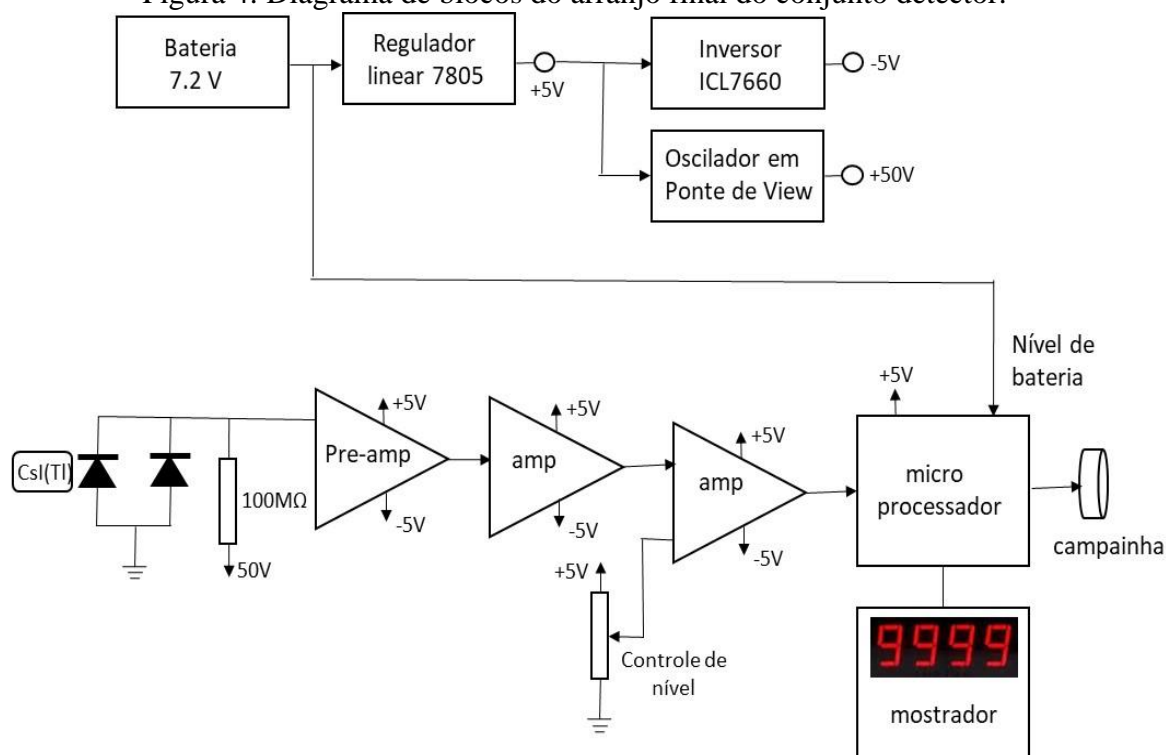
Problema semelhante foi encontrado no multiplicador de tensão para se obter o valor de 50 V para polarização reversa dos fotodiodos. De um modo geral, em circuitos multiplicadores são usados circuitos osciladores com saída de ondas quadradas e transformadores e da mesma forma que os circuitos inversores também produziram muito ruído no pré-amplificador. Assim, aproveitando da disponibilidade das tensões simétricas de + 5 V e -5 V, o circuito multiplicador foi construído também com um amplificador operacional, mas como um oscilador de deslocamento de fase na configuração chamada oscilador com ponte de Wien [7]. Este oscilador, Figura 3, produz uma onda senoidal que acoplada a um transformador produz a desejada elevação de tensão, sem a infinidade de harmônicos que um oscilador com onda quadrada produziria, tendo sido o circuito utilizado neste trabalho.

Figura 3 – Circuito oscilador em ponte de Wien e transformador para produção de 50 V para os fotodiodos



O diagrama de blocos da Figura 4 mostra o arranjo final da unidade desenvolvida. Para esta configuração, o vale formado entre a região de ruído e o fotopico do raio-X característico (13,9 keV e 17,8 keV) é fundamental para o correto funcionamento do sistema de contagens e por isso também é desejado que o conjunto apresente o menor ruído possível. Quanto menor a altura deste vale, menor tem que ser o nível do controle de limiar e com isso todas as radiações que produzem pulsos com amplitudes maiores que estas, ou seja, energias maiores que este limiar são contadas. Em outras palavras, quanto menor pode ser ajustado o controle de nível sem que se tenha contagens espúrias devido ao ruído, mais sensível fica o conjunto detector a baixas energias.

Figura 4: Diagrama de blocos do arranjo final do conjunto detector.



Para finalizar, o acoplamento óptico do cintilador ao fotodiodo foi feito com cola para acrílico modelo ACRICOL 900UV da Sinteglas®, que apresentou boa aderência e tem demonstrado durabilidade sem mostrar ataque químico ao cristal de CsI(Tl). Este por sua vez foi crescido no IPEN/CNEN-SP, segundo Cortese et all [8]. A altura de pulso com a cola foi comparada com a altura de pulso obtida utilizando graxa de silicone, que é um meio amplamente usado como acoplamento óptico em detectores de radiação.

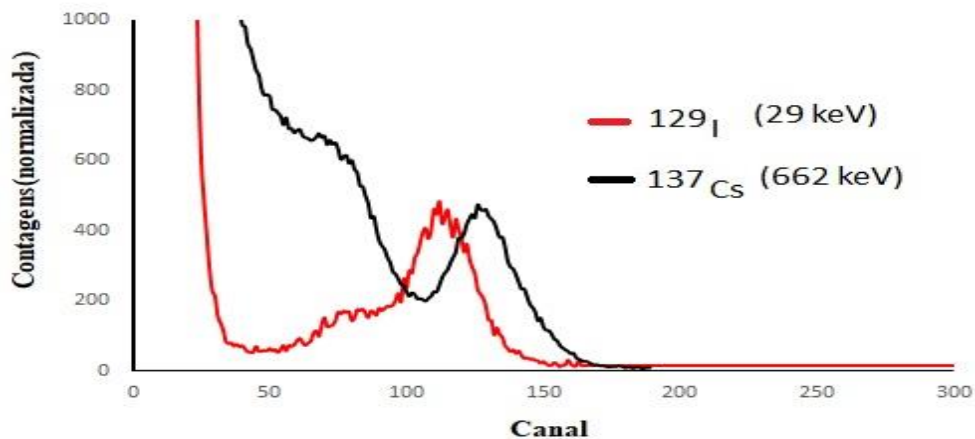
Apesar do acoplamento com a cola ter proporcionado uma altura de pulso 29% inferior ao acoplamento feito com graxa de silicone, a cola não apresenta o efeito de perda



do material de acoplamento por capilaridade como acontece com a graxa de silicone ao longo do tempo, que acabaria exigindo manutenções no conjunto detector.

Com o conjunto na sua versão final, fotodiodos em paralelo com um único pré-amplificador, foram obtidos os espectros de energia de uma fonte de  $^{129}\text{I}$ , emissor gama em 29 keV e de uma fonte de  $^{137}\text{Cs}$ , 662 keV, devido as suas energias terem grande aplicabilidade na área médica e industrial. O conjunto detector demonstrou sensibilidade tanto em 29 keV como em 662 keV e foi observado que esta última produz um número grande de contagens em baixas energias no fotodiodo sem cintilador, que não constitui um problema à medida em que estas contagens só aumentam a eficiência de detecção. Na Figura 5 são mostrados os espectros obtidos para estes dois radioisótopos e demonstra a resposta do conjunto detector para estas duas faixas de energia.

Figura 5 - Espectros de energia obtidos com dois fotodiodos em paralelo, sendo um deles acoplado a um cintilador de CsI(Tl) mostrando a capacidade de detecção nestas duas faixas de energia.



#### 4 CONCLUSÕES

A utilização de fotodiodos de silício para energias de raio-X e acoplados a cintiladores de CsI(Tl) para radiação gama tornam a faixa de energia dos detectores construídos com esses componentes amplas para serem utilizadas em várias aplicações.

A utilização dos fotodiodos em paralelo ou com circuitos pré-amplificadores em paralelo depende do comportamento do ruído do pré-amplificador em função da capacitância na entrada e deve ser estudado para cada circuito desenvolvido. A escolha adequada dos circuitos eletrônicos que o compõe são fundamentais para assegurar que a eficiência destes detectores em baixas energias não seja comprometida por ruídos introduzidos pelos circuitos de polarização.

## REFERÊNCIAS

1. KNOLL, G. F. Radiation Detection Measurement. 3ed. New York: John Wiley & Sons, 1999.
2. JURSNIC, P. PIN diodes for radiation therapy use: Their construction, characterization, and implementation. *Physica Medica*, v. 59, p. 86-91, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2019.02.021>> Acesso em: 27 junho de 2019.
3. YANAGIDA, T. Inorganic scintillating materials and scintillation detectors. *Proc. Jpn. Acad., Ser. v. 94, n. 2, p. 75-97, 2018.* Disponível em: <<https://doi.org/10.2183/pjab.94.007>> Acesso em: 03 julho de 2019.
4. JIMÉNEZ, F. J. R. X-Ray Spectroscopy with PIN diodes. Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, 2006. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/229038928>> Acesso em: 26 abril de 2020.
5. FAGIONATO, E. A.; GENEZINI, F. A.; ZAHN, G. S. Development of a Charge – Sensitive Preamplifier Using Commercially Available Components. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, 2013. Disponível em: <<https://www.ipen.br/biblioteca/2013/inac/19266.pdf>>. Acesso em: 15 agosto de 2019.
6. HAMAMATSU SOLID STATE. Si PIN photodiode S5106, S5107, S7509, S7510. Disponível em: <<https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/212374/HAMAMATSU/S5106.html>>. Acesso em 10 de junho de 2021.
7. BOYLESTAD, R.; NASHELESKY, L. Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos. 6ta. Ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., 1999.
8. CORTESE, V. C.; MARIA DA CONCEIÇÃO COSTA PEREIRA, M. C. C.; HAMADA, M. M. 2005 International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2005, Santos, SP, Brazil, 2005.