

# Estudo conceitual de um sistema de baixo custo para monitorar radiação voltada para satélites em órbita baixa

Daniel Santiago Umaña Salinas<sup>1, \*</sup>, Márcio Afonso Arimura Fialho<sup>1</sup>, Silvio Manea<sup>1</sup>,  
Juliano de Quadro Moreira<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil

\*Aluno de Mestrado do curso Engenharia e Tecnologia Espaciais / Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais CSE

[daniel.salinas@inpe.br](mailto:daniel.salinas@inpe.br)

---

***Resumo.** Danos por radiação são uma das principais causas de falha de componentes eletrônicos em satélites artificiais. O monitoramento diário da radiação a que estão expostos os satélites artificiais é importante para a posterior investigação de falhas. Neste artigo, se descreve o conceito de um detector de partículas de uso espacial, de baixo custo, tendo como objetivo realizar um mapeamento do ambiente espacial, para proteger os equipamentos eletrônicos embarcados em satélites artificiais em órbitas baixas, em especial, ao passarem pela região da Anomalia do Atlântico Sul.*

---

**Palavras-chave:** Detector de partículas; Detectores de radiação; Ambiente espacial; Transistores RadFET; Fotodiodo PIN

## 1. Introdução

Os satélites que são lançados e colocados em órbita estão expostos à radiação espacial, que pode ter efeitos graves na sua eletrônica embarcada (STASSINOPOULOS; RAYMOND, 1988), portanto, é importante o monitoramento contínuo da radiação presente no ambiente espacial, de forma que se possa proteger satélites artificiais e sondas espaciais quando ocorrerem eventos que levem a um aumento súbito na taxa de dose, como por exemplo, explosões solares.

O monitoramento contínuo da radiação espacial também pode proporcionar um melhor entendimento da dinâmica das partículas de alta energia, ajudando a prever seu comportamento futuro. Este conhecimento será importante para guiar o desenvolvimento de blindagens mais eficazes a um custo mais baixo, aumentando as possibilidades do emprego de componentes COTS (*Commercial-off-the-shelf*) em circuitos que não sejam muito críticos em futuras missões espaciais, em oposição ao uso de componentes resistentes ou tolerantes à radiação. Componentes resistentes e tolerantes à radiação são muito mais caros que componentes comerciais, devido ao pequeno volume de mercado e ao uso, muitas vezes, de processos de fabricação dedicados.

O objetivo deste artigo é apresentar a concepção de um instrumento de uso espacial capaz de detectar partículas espaciais de alta energia e medir a dose acumulada de radiação ionizante, utilizando sensores eficientes e de baixo custo, como os diodos PIN para detecção de SEE (*Single Event Effects*) e RADFETs como dosímetros. Um dos objetivos finais deste sistema é contribuir com a proteção de futuros satélites desenvolvidos pelo Brasil e assim reduzir os custos de futuras missões espaciais brasileiras.

Este trabalho está organizado da seguinte forma: A Seção 2 faz uma breve revisão teórica do ambiente espacial, de detectores de radiação, de sistemas de detecção e sensores, fotodiodos PIN e RadFETs. A Seção 3 descreve a metodologia adotada neste trabalho e alguns circuitos de exemplo. A Seção 4 apresenta o experimento proposto e suas características gerais. Por fim é apresentada a conclusão na Seção 5.

## **2. Revisão Teórica**

### ***A. O Ambiente Espacial***

A eletrônica utilizada nos satélites artificiais está exposta à radiação de diferentes fontes, tais como: radiação aprisionada no campo magnético terrestre (cinturões de radiação), raios cósmicos e partículas oriundas de explosões solares. Os ambientes aos quais os satélites estão expostos já são estudados há várias décadas, principalmente desde a descoberta dos cinturões de radiação, sendo estes últimos onde os componentes sensíveis à radiação são mais afetados (BOYD, 2018; REEVES et al., 2013). Existem partículas com altos níveis de energia que conseguem penetrar a magnetosfera terrestre, que é um escudo natural gerado pelo campo magnético da Terra. As partículas que ficam aprisionadas no campo magnético da Terra dão origem aos cinturões de radiação (CLARO; SANTOS, 2005; TAVARES; MANEA; ALVES, 2018).

Devido ao impacto repetido das partículas, a vida útil dos componentes e do satélite será reduzida. Uma forma de resolver a dificuldade imposta pela presença de radiação ionizante no espaço é utilizar componentes que sejam tolerantes ou resistentes à radiação, ou projetar blindagens. Esses componentes são integrados e testados com níveis elevados de confiabilidade para garantir seu desempenho nas condições espaciais previstas para as doses calculadas (TAVARES; MANEA; ALVES, 2018).

A radiação provoca vários efeitos em componentes eletrônicos, sendo os principais: a Dose Total Ionizante (*Total Ionizing Dose*), que consiste em danos devido à ionização do material do qual é construído o componente; o Dano de Deslocamento (*Displacement Damage*), consistindo de danos devido ao deslocamento de átomos da rede cristalina, com formação de vacâncias e átomos intersticiais; e Efeitos de Evento Único (*Single Event Effects*), eventos pontuais decorrentes da interação de uma única partícula de alta energia com o componente eletrônico (CLARO; SANTOS, 2005).

Os níveis de radiação aos quais os componentes embarcados em satélites são expostos podem ser expressos como doses de radiação ionizante e fluxos de partículas. Estes valores

podem ser usados para se estimar a probabilidade de danos ou *upsets* aos componentes eletrônicos do sistema (STASSINOPOULOS; RAYMOND, 1988).

### ***B. Detectores de radiação***

Um detector transforma a energia proveniente da radiação num sinal elétrico, esta resposta está relacionada com a quantidade de radiação incidente no detector (SCARPIN, 2016). A taxa de radiação incidente e a variação do tempo de resposta determina a eficiência do detector. Esta eficiência é normalmente chamada eficiência intrínseca, que depende do circuito eletrônico utilizado para capturar e analisar o sinal do detector (SCARPIN, 2016).

### ***C. Sistema de detecção e sensores***

O sistema de detecção de radiação proposto irá empregar diodos PIN para detecção de SEEs (*Single Event Effects*) e RADFETs como dosímetros. A detecção de SEEs irá empregar como elemento principal diodos PIN, que indicarão, por meio de um circuito de discriminação do sinal e circuito de processamento, quando uma partícula atravessa a região ativa desses diodos, dissipando energia em ionização e excitação de átomos e moléculas do material. O sinal elétrico gerado pelos fotodiodos PIN é normalmente caracterizado como um pulso de corrente (CLARO; SANTOS, 2005). O pulso transporta informações da interação da partícula incidente com o detector, de onde é possível inferir qual tipo de partícula que atravessou o detector e a sua energia mais provável (CLARO; SANTOS, 2005). Para obter uma estimativa de energia e poder ter uma contagem de partículas (espectrometria de radiação) é comum o uso da análise de pico do pulso PHA (*Pulse Height Analysis*), relacionado à energia depositada no diodo PIN, que será o material detector.

### ***D. Fotodiodos PIN***

Os fotodiodos de silício tipo PIN (junção PN com uma camada intrínseca entre as regiões P e N) são mais eficientes que detectores semicondutores de junção PN convencionais e oferecerem uma boa sensibilidade a várias formas de radiação (MICROSEMI, 1998). Os diodos PIN possuem como características o tamanho reduzido e baixo consumo de energia permitindo medições próximas às fontes de radiação. São de grande interesse para instalações de irradiação de circuitos e componentes, onde eles são posicionados próximos às fontes emissoras, bem como para utilização embarcada em aeronaves e satélites.

Como é sabido os diodos deixam fluir a corrente somente em uma determinada direção. Se uma tensão reversa for aplicada no diodo PIN, ele apresentará uma corrente reversa de alguns microamperes. Um fotodiodo funciona como um diodo, mas sua corrente reversa aumenta com a incidência de luz. É esta operação fotocondutiva luminosa que permite detectar a intensidade da radiação luminosa no dispositivo e da radiação com maior energia. Em circuitos de detecção de radiação, o fotodiodo do tipo PIN é normalmente polarizado reversamente (ENLINTTECH, [2020?]; SCARPIN, 2016). Muitos dos fotodiodos disponíveis hoje são do tipo PIN. Segue na Tabela 1 alguns exemplos.

**Tabela 1. Exemplos de diodos PIN. Fonte: Adaptado de Scarpin (2016).**

SFH206F	OSRAM Opto Semiconductors - Photodiode PIN Chip 850nm 0.62A/W Sensitivity 2-Pin T-1 3/4 T/R - Silicon-PIN-Photodiode with Daylight Filter
BN11F	Usado em pesquisas acadêmicas, mas sem mais informações até o momento
L14G1	Onsemi - SENSOR PHOTO 880NM TOP TO206AA
BPW34	Vishay Intertechnologies - Photodiode PIN Chip 900nm 2-Pin
BPX61	OSRAM Opto Semiconductors - Photodiode PIN Chip 850nm 0.62A/W Sensitivity 2-Pin TO-5
BPV11F	Intertechnologies - Phototransistor IR Chip Silicon 930nm 2-Pin T-1 3/4
XRA24	Usado em pesquisas acadêmicas, mas sem mais informações até o momento

Os fotodiodos SFH206 e o BPW34 são os mais usados em trabalhos acadêmicos, incluindo os que foram testados no IEAv em 2016, tendo, portanto, como vantagem a existência de informações já trabalhadas (SCARPIN, 2016).

### E. RadFETs

*RadFETs* são transistores de efeito de campo (*MOSFETs*), otimizados para monitoramento e leitura direta da dose acumulada de radiação (HOLMES-SIEDLE; ADAMS, 1986). Quando a radiação ionizante atravessa a camada de óxido de *gate*, são produzidos pares de elétron-lacuna, sendo que as lacunas acabam aprisionadas no óxido de *gate*, levando a uma modificação permanente na tensão de limiar  $V_{th}$  do transistor. A mudança de  $V_{th}$  depende da quantidade de radiação que atinge o dispositivo. Medindo a mudança de  $V_{th}$  (por exemplo, forçando uma corrente DC fixa no dispositivo), obtém-se uma indicação da dose recebida pelo *RadFET* (MANEA *et al.* 2020). A Tabela 2 apresenta alguns exemplos.

**Tabela 2. Exemplos de RadFETs. Fonte: Adaptado de (MANEA *et al.* 2020).**

<b>REM RFT300-CC10G1 (HOLMES, et al. 2013)</b>	Óxido de <i>gate</i> com espessura de 300 nm;
	Sensibilidade de 1,5 mV / cGy e um invólucro praticamente transparente à radiação;
	Adequado para muitos feixes de radiação e espaço.
<b>TY1004 (chip) (HUBERT, et al. 2018)</b>	Fabricado pela Tyndall National Institute;
	Incorpora dois <i>RadFETs</i> idênticos com uma espessura de óxido de <i>gate</i> de 400 nm;
	Área ativa muito pequena (superfície de óxido de <i>gate</i> ): 300 $\mu\text{m}$ por 50 $\mu\text{m}$ .
<b>Transistor MOSFET LS 3N163 PMOS (OLIVEIRA, et al. 2018)</b>	Tem uma sensibilidade de 33 mV / Gy no modo não polarizado e 62 mV / Gy no modo polarizado.
<b>FGDOS (Chip) (FERRARO, et al. 2017)</b>	Dosímetro baseado em <i>gate</i> flutuante projetado, desenvolvido e comercializado pela iC-Málaga;
	Tem alta linearidade e resposta de sensibilidade adequada para aplicações espaciais.
<b>VT01 / VT02 (Chip) (Varadis, [2020?])</b>	Chip Varadis de 400 nm;
	Consiste em dois <i>RadFETs</i> idênticos que possuem terminais individuais de <i>gate</i> e dreno, enquanto a fonte e o substrato são conectados;
	Apresentam uma grande faixa dinâmica, de 1 cGy (1 rad) a 1 kGy (100 krad);
	Cada chip contém dois transistores internos, além de um diodo de proteção;
	Operam com baixo valor de corrente de polarização (recomendado 10 $\mu\text{A}$ );
	VT01 tem encapsulamento plástico e o VT02 encapsulamento cerâmico.

## 3. Metodologia

Foram consultados vários artigos sobre o assunto (CLARO; SANTOS, 2005; HOLMES-SIEDLE; ADAMS, 1986; HOLMES-SIEDLE *et al.*, 2013; MANEA *et al.* 2020;

MARTINS, 2011; PICOZZA, 2019; SCARPIN, 2016; TAVARES; MANEA; ALVES, 2018), de onde foram obtidas ideias que fundamentaram o circuito proposto, descrito na Seção 4.

A análise detalhada do funcionamento de instrumentos de detecção de radiação começa com uma revisão dos conceitos e funcionamento dos componentes que o constituem, seguida por uma análise operacional dos detectores atualmente disponíveis no mercado. Este estudo forneceu subsídios para a definição da arquitetura do experimento e de componentes que poderiam ser utilizados. Uma vez definidos os componentes eletrônicos que podem ser utilizados, procedemos à definição dos requisitos mínimos para um detector de baixo custo e baixa massa, dando como resultado o projeto conceitual de um experimento dosímetro e detector de partículas de alta energia de uso espacial, destinado principalmente para missões em órbita baixa.

Após realizar uma revisão dos conceitos para verificar os componentes que poderiam ser utilizados no sistema, foi elaborada uma lista de elementos semicondutores à base de silício de acordo com os componentes já utilizados em detectores de radiação (SCARPIN, 2016) e que poderiam ser utilizados no experimento. Alguns destes componentes já foram apresentados na Tabela 1 e na Tabela 2.

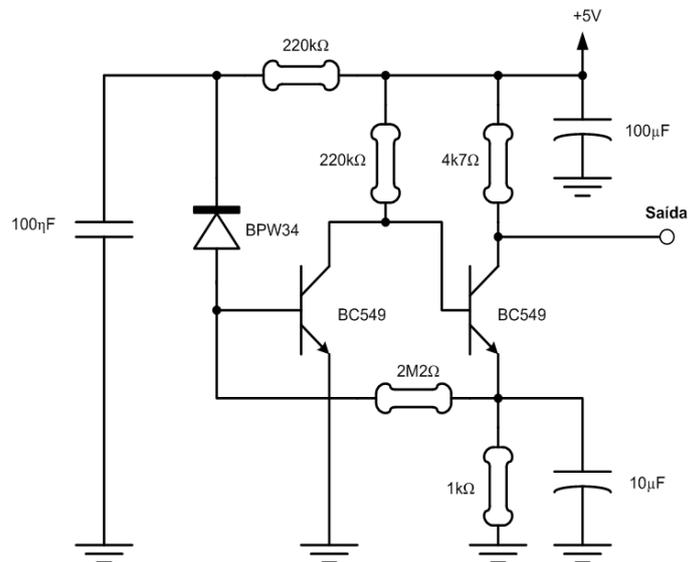
#### ***A. Exemplo de circuito de detecção com fotodiodo***

A Figura 1 apresenta um exemplo de circuito de detecção. Neste circuito, um sinal proveniente do fotodiodo PIN chaveia o primeiro transistor para condução, levando o segundo transistor ao corte, o que por sua vez leva a saída para nível lógico alto. Resumindo, ele indica a detecção do diodo PIN que aciona um sinal na saída. Isso pode ser usado para indicar que existe uma detecção que pode ser lida (SCARPIN, 2016).

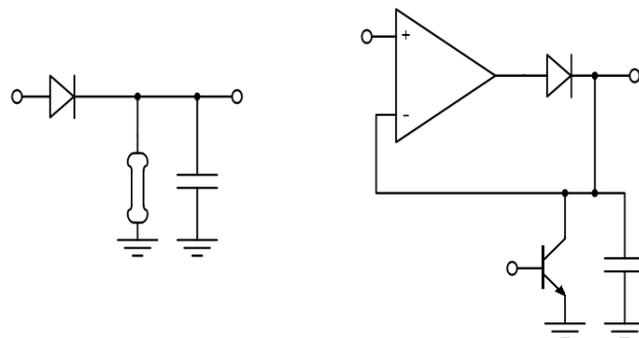
#### ***B. Detectores de Pico***

A Figura 2 apresenta exemplos de circuitos que permitem ler o valor de pico de um sinal de entrada. O circuito descrito à esquerda na Figura 2 é um exemplo de um circuito simples detector de pico, que é composto por um diodo, um resistor de descarga e um capacitor de retenção de pico. Para compensar a queda de tensão no valor de saída através do diodo, um amplificador operacional pode ser usado (Figura 2, à direita). Para descarregar o capacitor de forma controlada, após a leitura, pode-se utilizar um transistor (MENDONÇA; GONÇALEZ, 2022).

Uma vantagem do uso do amplificador operacional é a possibilidade de condicionar o sinal para conversão A/D (MENDONÇA; GONÇALEZ, 2022).



**Figura 1. Circuito de detecção com fotodiodo BPW34.**  
Fonte: Adaptado de Kainka (2011).



**Figura 2. Exemplos de circuitos detectores de pico. Fonte: Autor.**

## 4. Resultados e Discussão

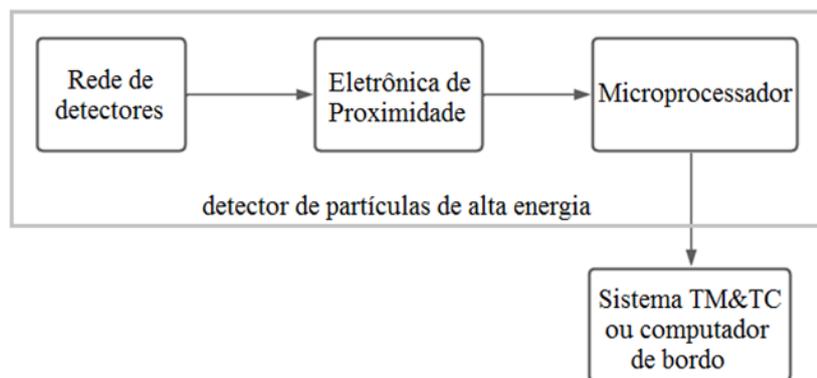
A pesquisa bibliográfica realizada no início do estudo mostrou ser possível construir um detector de radiação de baixo custo usando fotodiodos PIN e RADFETs (ENLITECH, [2020?]; SCARPIN, 2016).

### *A. Descrição resumida do experimento proposto*

A Figura 3 apresenta um diagrama em blocos do instrumento proposto. A eletrônica de proximidade será responsável por condicionar e digitalizar pulsos provenientes das partículas que atingem os fotodiodos PIN e as tensões presentes nos *RADFETs*. Estes dados são enviados a um microprocessador, responsável por formatar e enviar essas

leituras para o subsistema de *TM&TC* ou para o computador de bordo do satélite. As detecções de partículas pelos fotodiodos serão datadas, de forma a possibilitar o reconhecimento da posição na órbita em que ocorreram as detecções, o que é importante para fazer um mapeamento da região da Anomalia do Atlântico Sul e de outras regiões de interesse. Já os *RADFETs* serão usados como dosímetros, permitindo a medição da dose total acumulada em função da espessura de blindagem.

A Figura 4 apresenta o conceito da estrutura física do sistema de detecção. A presença de três placas empilhadas, cada uma com seu fotodiodo, permite se obter uma discriminação melhor da energia das partículas do que seria possível com um único fotodiodo, já que o número de fotodiodos atravessados por uma mesma partícula dependerá da sua energia. O colimador restringe o ângulo de incidência das partículas, diminuindo a ambiguidade na determinação da energia das partículas incidentes devido à incerteza do ângulo de incidência dessas partículas nos fotodiodos.



**Figura 3. Diagrama de blocos do experimento proposto. Fonte: Autor.**

### ***B. Montagem dos detectores de partículas de alta energia e dos dosímetros RADFETs***

A Figura 4 mostra a montagem dos fotodiodos e dosímetros no experimento proposto. Quanto maior a energia da partícula incidente maior é o número de fotodiodos que a partícula consegue atravessar. Por exemplo, poderia se ter a primeira blindagem deixando passar prótons com mais de 10 MeV, a segunda, prótons com mais de 30 MeV e a terceira, prótons acima de 70 MeV, para incidência normal. Outros tipos de partículas (como por exemplo, partículas alfa e núcleos de átomos mais pesados) também poderão ser registradas pelo detector, no entanto, o limiar de energia necessário para elas atravessarem cada camada da blindagem será diferente, uma vez que partículas diferentes depositam quantias diferentes de energia por unidade de comprimento percorrida no material. Já o ângulo de incidência controla o quanto de material a partícula precisa atravessar para alcançar o próximo fotodiodo. A discriminação entre diferentes tipos de partícula será possível através da quantidade de energia depositada em cada fotodiodo, e pelas características dos pulsos produzidos (intensidade, duração, formato, etc.) em cada fotodiodo.

A montagem deve ser feita junto à carcaça do satélite, e deve ter uma dimensão reduzida por motivo de massa. O módulo de processamento deve ter como dimensão o padrão 1U ( $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ ) que é conhecido como "uma unidade" usado comumente em missões porque não requer de muito espaço, também podendo ser chamado "*CubeSat 1U*" (CROOK, 2009). Quanto à localização, os dosímetros RadFET poderão ser posicionados próximos aos fotodiodos (como mostrado na Figura 4), ou serem incorporados na placa do módulo principal, ou na estrutura do satélite, ou ainda, em um instrumento à parte, dependendo dos objetivos da missão do sistema.

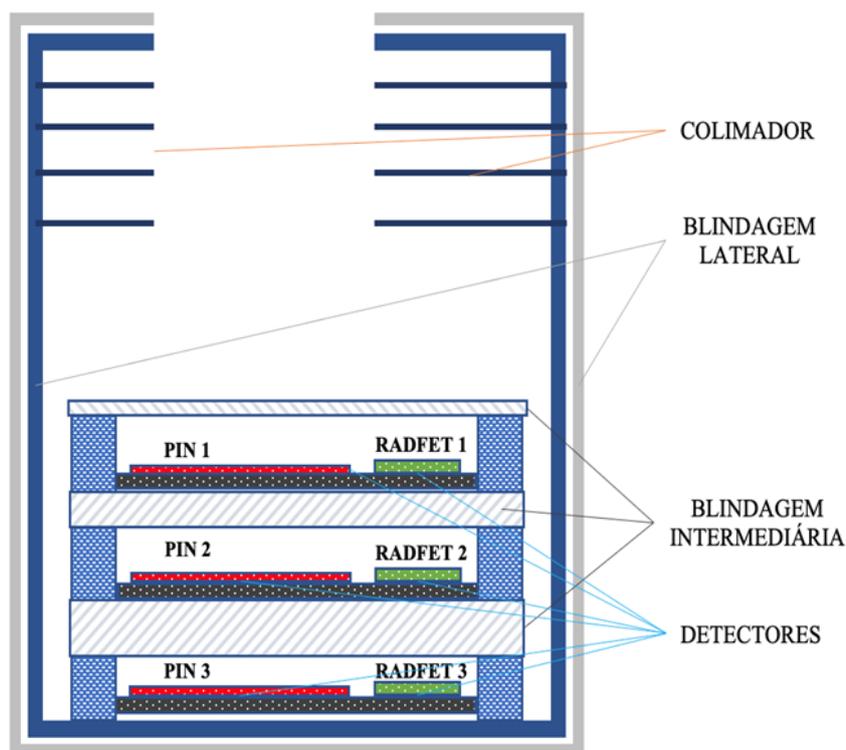


Figura 4. Concepção do detector de partículas de alta energia e dosímetro. Fonte: Autor.

### C. Características gerais do experimento

A estimativa de consumo ficou em 1,5 W, suficiente para operar o detector considerando o consumo dos componentes analógicos e digitais na placa, por exemplo, os diodos PIN e usando um sistema onde a energia é limitada, porém, mantendo a margem de segurança de 25%.

A taxa de dados será de aproximadamente 2 kbytes/dia de telemetria. Os dados ficarão em memória interna que não precisará ser de grande capacidade, já que os dados se resumem aos registros dos eventos detectados pelos fotodiodos e a leituras periódicas dos *RADFETs*, incluindo a datação da ocorrência desses eventos e dessas leituras periódicas.

As dimensões do módulo de processamento devem ficar em 90,17 x 95,89 x 7,84 mm, de acordo com um estudo de PCB realizado para este módulo. A massa de toda a eletrônica do experimento deve ficar abaixo de 600 g, já considerando a blindagem.

#### ***D. Desenvolvimento da Placa***

Para fazer o circuito será necessário o uso de uma ferramenta de *layout*. Essa ferramenta pode ser o *Kicad* por ter licença livre e apresentar os recursos necessários para a execução do projeto. O Editor de PCB (*Printed Circuit Board*) do *KiCad* é acessível o suficiente para tornar os projetos de PCB fáceis e é poderoso o suficiente para projetos modernos complexos. Medrano, Serra e Soto (2017) apresentam o software livre *Kicad*, para modelagem e desenho de placas de circuito impresso.

### **5. Conclusão**

Após uma revisão da literatura, observa-se a importância do monitoramento da radiação presente no ambiente espacial. Desta forma, foi apresentada a concepção de um sistema detector de partículas com capacidade de medir a energia das partículas, usando componentes de baixo custo. O sistema também incluirá RadFETs como dosímetros. O objetivo final do sistema será realizar um mapeamento do ambiente espacial em órbita baixa.

Como trabalho futuro, a próxima etapa será aprofundar o estudo de alternativas disponíveis e detalhar melhor o projeto. Este sistema, uma vez construído e colocado em órbita a bordo de um nanossatélite (por exemplo, um cubesat), permitirá se ter um melhor conhecimento do ambiente espacial, conhecimento este que permitirá planejar blindagens mais efetivas e mais baratas para futuras missões espaciais.

***Agradecimentos:*** *Agradecemos à CAPES e ao INPE pelos recursos oferecidos.*

### **Referências**

- BOYD, Alexander J. *et al.* What causes radiation belt enhancements: A survey of the Van Allen Probes Era. **Geophysical Research Letters**, v. 45, n. 11, p. 5253-5259, 2018.
- CLARO, L. Henrique; SANTOS, J. Antonio. Danos de Radiação em Componentes Eletrônicos nas Aplicações Aeroespaciais. In: INTERNATIONAL NUCLEAR ATLANTIC CONFERENCE - INAC, 2005. Santos. **Anais eletrônicos...** Santos: Associação Brasileira de Energia Nuclear – ABEN, 2005. Disponível em: <https://www.ipen.br/biblioteca/cd/inac/2005/full/1450.pdf>. Acesso em: 09/09/2022.
- CROOK, Matthew R. **NPS CubeSat launcher design, process and requirements**. NAVAL POSTGRADUATE SCHOOL MONTEREY CA, 2009.
- ENLITECH. Photodiodes Characterization Brief Introduction and Guidance. Enlitech, Kaohsiung City, [2020?]. Disponível em: <https://enlitechnology.com/blog/pd/photodetector-01/>. Acesso em: 22 jul. 2022.
- FERRARO, Rudy *et al.* Design of a radiation tolerant system for total ionizing dose monitoring using floating gate and RadFET dosimeters. **Journal of Instrumentation**, v. 12, n. 04, p. C04007, 2017.
- HOLMES-SIEDLE, Andrew; ADAMS, Leonard. RADFET: A review of the use of metal-oxide-silicon devices as integrating dosimeters. **International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part C. Radiation Physics and Chemistry**, v. 28, n. 2, p. 235-244, 1986.

- HOLMES-SIEDLE, A. G. *et al.* RADFET dosimeters in the belt: The Van Allen Probes on day 365. In: 2013 **14th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS)**. IEEE, 2013. p. 1-7.
- HUBERT, Nicolas; DOHOU, Francis; PÉDEAU, D. RadFET Dose Monitor System for Soleil. In: **Proceedings of 7th International Beam Instrumentation Conference (IBIC)**, Shanghai, China. 2018.
- KAINKA, Burkhard. Measure gamma rays with a photodiode. Radiation detector using a BPW34. **Elektor Magazine**, n. 6, p. 22-26, 2011.
- MANEA, Sílvia *et al.* CCRAD-CUBESAT'S COTS RADIATION DETECTOR. **IV IAA Latin American CubeSat WORKSHOP R**, [s. l.], p. 1-10, 2020. Disponível em: [https://www.researchgate.net/profile/Juliano-Moreira-5/publication/344433669\\_CCRAD\\_CUBESAT'S\\_COTS\\_RADIATION\\_DETECTOR/links/5f9038c0458515b7cf910b80/CCRAD-CUBESAT'S-COTS-RADIATION-DETECTOR.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Juliano-Moreira-5/publication/344433669_CCRAD_CUBESAT'S_COTS_RADIATION_DETECTOR/links/5f9038c0458515b7cf910b80/CCRAD-CUBESAT'S-COTS-RADIATION-DETECTOR.pdf). Acesso em: 21 set. 2022.
- MARTINS, João Francisco Trencher. **Desenvolvimento do cristal semiconductor de iodeto de mercúrio para aplicação como detector de radiação**. 2011. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- MEDRANO, Alberto; SERRA, Ágel; SOTO, Carlos. KiCad, Herramienta de Software Libre de Modelado de Circuitos Impresos para el Desarrollo de Hardware. **Ciencia e Ingeniería**, v. 38, n. 2, p. 177-186, 2017. ISSN: 1316-7081. Disponível em: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=507555007010>. Acesso em: 6 set. 2022.
- MENDONÇA, Eduardo Gomes; GONÇALEZ, Odair Lelis. A simple model of the accumulation of trapped ionization charges for RADFET dosimeters Um modelo simples de acumulação de cargas de ionização retidas para dosímetros RADFET. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 4, p. 28753-28759, 2022.
- MICROSEMI. Pin Diode Radiation Detectors. In: **The PIN Diode Circuit Designers' Handbook**. Watertown: Microsemi-Watertown, 1998. Appendix - F. Disponível em: [https://www.microsemi.com/sites/default/files/datasheets/Products/rf/](https://www.microsemi.com/sites/default/files/datasheets/Products/rf/APPENDIX%20F.pdf). Acesso em: 01 nov. 2022. Livro completo disponível em: <https://www.microsemi.com/sites/default/files/datasheets/Products/rf/>.
- OLIVEIRA, Juliano *et al.* Single event effect: Simulations and analysis on 3N163 PMOS transistor. In: **2018 IEEE 19th Latin-American Test Symposium (LATS)**. IEEE, 2018. p. 1-3.
- PICOZZA, P. *et al.* Scientific goals and in-orbit performance of the high-energy particle detector on board the CSES. **The Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 243, n. 1, p. 16, 2019.
- REEVES, G. D. *et al.* Electron acceleration in the heart of the Van Allen radiation belts. **Science**, v. 341, n. 6149, p. 991-994, 2013.
- SCARPIN, Jorge Alberto. **Detector de raios X baseado no diodo pin**. 2016. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- STASSINOPOULOS, E. G.; RAYMOND, James P. The space radiation environment for electronics. **Proceedings of the IEEE**, v. 76, n. 11, p. 1423-1442, 1988.
- VARADIS. **User manual RADFET reader pro**: Cork: Varadis, [2020?]. v. 1.4, 12 p.. Disponível em: [https://www.varadis.com/wp-content/uploads/2020/11/Radfet\\_Reader\\_PRO\\_user\\_manual\\_V1p4.pdf](https://www.varadis.com/wp-content/uploads/2020/11/Radfet_Reader_PRO_user_manual_V1p4.pdf). Acesso em: 20 out. 2022.
- TAVARES, Felipe Oliveira; MANEA, Sílvia; ALVES, Livia Ribeiro. **Estudo comparativo de topologias para desenvolvimento de instrumento detector de elétrons e prótons de alta energia para aplicação espacial em satélites**. 9° WETE - Workshop em Engenharia e Tecnologia Espaciais - INPE, 15 e 16 de agosto de 2018.