



Estudo comparativo de topologias para desenvolvimento de instrumento detector de elétrons e prótons de alta energia para aplicação espacial em satélites

Felipe Oliveira Tavares ¹, Sílvia Manea ², Livia Ribeiro Alves ³

¹ Aluno de Mestrado do curso de Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais - CSE
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

²Engenharia e Tecnologias Espaciais - ETE/
Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais - CSE
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

³Divisão de Geofísica Espacial /
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

felipe.tavares@inpe.br

Resumo. A segurança para o uso do ambiente espacial tem motivado a comunidade científica a esforçar-se em tornar satélites e equipamentos eletrônicos embarcados melhor qualificados a exposição à radiação ionizante, bem como contribuir para a segurança de tripulantes. A região do espaço próximo a Terra onde se observa o maior fluxo de partículas carregadas energéticas é conhecida como cinturão de radiação ou de Van Allen. Em termos gerais, esse cinturão se divide em duas regiões, sendo os prótons mais frequentes na região mais interna e os elétrons na mais externa. No presente trabalho é proposto o estudo de possíveis topologias para compor um instrumento de coleta e aquisição do fluxo de elétrons e prótons relativísticos armadilhados na região do cinturão interno e externo a ser embarcado em satélite. A metodologia se baseou em dividir o sistema de detecção em três subsistemas (elemento sensor, formatação de sinal e processamento), desenvolver modelos virtuais com combinações de soluções na literatura para cada um desses, simular o ambiente da aplicação e registrar medidas de efetividade de cada conjunto. Desse modo é possível criar um banco de dados com as principais capacidades e limitações de cada tecnologia para auxiliar no desenvolvimento do instrumento detector futuro.

Palavras-chave: Detector de radiação; Satélite clima espacial; Cinturão de Van Allen; Espectrometria de radiação.

1. Introdução

O estudo do ambiente espacial próximo a Terra, mais especificamente o cinturão de radiação, tem relevância tanto econômica quanto científica. Sabe-se que as partículas energéticas armadilhadas nessa região são uma das principais causas de falhas em dispositivos espaciais. Dessa forma, estimar o comportamento da radiação nesse ambiente é de suma importância para a mitigação dessas falhas e assim redução de custos das missões espaciais. Do ponto de vista científico, o estudo dos cinturões de radiação pode fornecer dados para aprimorar modelos do



clima espacial, essenciais para o entendimento de fenômenos associados ao acoplamento Solar-Terrestre como por exemplo, a dinâmica das auroras e das tempestades geomagnéticas.

Desde o início da era dos satélites, inúmeras missões espaciais tiveram como um dos seus objetivos caracterizar a radiação espacial observada na região da magnetosfera interna. Dentre essas missões, a Explorer I foi responsável por fornecer os dados que permitiram a descoberta dos cinturões de radiação, no final dos anos 1950. No entanto, somente na última década é que se teve uma instrumentação espacial capaz de fornecer dados de observação *in situ*, obtida por um longo período, na região do cinturões de Van Allen, a missão Van Allen Probes. A Figura 1, mostra um exemplo da variabilidade do fluxo de elétrons relativísticos obtidos durante um período 6 dias das medidas das sondas Van Allen Probes.

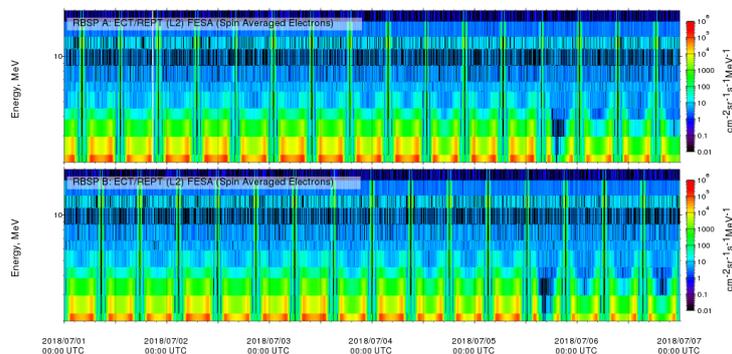


Figura 1. Fluxo de elétrons e prótons do período de 6 dias observados pela missão Van Allen Probes. FONTE: <http://rbspgway.jhuapl.edu/rPlotTime?smr>

O contínuo monitoramento do cinturão de radiações pode proporcionar um melhor entendimento da dinâmica de alguns fenômenos ainda não completamente explicados, que proporcionam o equilíbrio entre os mecanismos de perda e aceleração de partículas carregadas nesse meio. Atualmente, tem-se diversas missões com objetivo de estudo do cinturão de radiação [Fennell et al. 2016]. Em [Boyd et al. 2018], por exemplo é proposto que a aceleração local seja um mecanismo dominante descrito por interações ressonantes de elétrons, na faixa de energia em MeV, com ondas eletromagnéticas da magnetosfera presentes na região do cinturão de radiação externo. Contudo os autores destacam que por mais que esse mecanismo seja expressivo para o conjunto de eventos estudados, não pode resolver a questão global de aceleração de partículas e, portanto requer mais pesquisas e monitoramento nesta área.

As partículas armadilhadas no cinturão de radiação são provenientes de diversas fontes, tais como a ionosfera, e o plasma do vento solar. De forma geral, uma partícula carregada sob ação de um campo magnético dipolar como o da magnetosfera interna pode ser aprisionada se certos parâmetros, próprios e de sua interação com o campo magnético, permanecem constantes em um dado período. Os parâmetros chamados invariantes adiabáticos, são usados para descrever o movimento de partículas carregadas no campo dipolar e podem ser divididos em três movimentos típicos (Figura 2). Qualquer violação na invariância de algum desses perde-se a coerência de aprisionamento. O primeiro invariante, dito ciclotrônico (*gyro*), refere-se ao movimento circular em torno de uma linha de campo da magnetosfera, realizado pela partícula carregada quando seu momento magnético é invariante. A medida que a partícula se aproxima de um polo a concentração de linhas aumenta e conseqüentemente o ângulo de cada espira, denominado como *pitch angle*, se aproxima de 90° em relação a direção ao movimento. Nesse ponto de espelhamento, a partícula inverte a direção do seu movimento. Isso ocorre em ambos os polos, e é chamado de movimento *bounce*. O segundo invariante adiabático dita que a integral do momento paralelo ao longo de um ciclo do movimento de espalhamento completo é constante,



equivalente a alguns segundos. Por fim, tem-se o movimento de *drift* relacionado ao transporte das partículas no sentido longitudinal da magnetosfera terrestre. O invariante adiabático que descreve esse movimento diz que o fluxo magnético através da superfície delimitada pela trajetória da partícula carregada deve ser constante. Como o campo magnético terrestre varia com a longitude, a partícula vai permanecer em uma superfície desde de que o fluxo total envolvido por ela seja constante.

Para investigar os mecanismos de aceleração existe um interesse, pela comunidade científica, em dados de instrumentos espaciais que possibilitem estimar o fluxo de partículas em diferentes regiões da magnetosfera, particularmente nas camadas L=2 a L=7, em termos de energia, espécie de partícula e direção *pitch angle*. Com esses dados é possível calcular os invariantes adiabáticos e com isso encontrar violações que caracterizam eventos de ejeção de partículas (*dropout*). Para tanto é necessário um detector espacial capaz de classificar elétrons e prótons em pelo menos 5 faixas de energia de tamanhos iguais, entre (2-10 MeV) e (15 - 30 MeV) respectivamente. Deve-se também estimar a direção de incidência dessas partículas em relação a uma linha de campo, com resolução angular de pelo menos 10°.

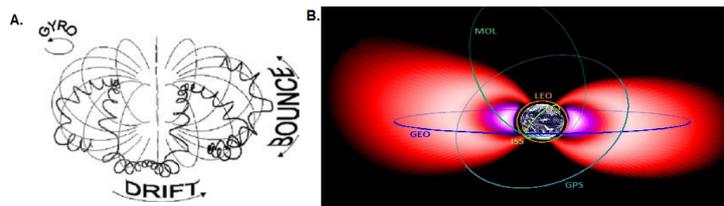


Figura 2. A. Armadilhamento de partículas na magnetosfera. [Schrijver and Siscoe 2010] B. Cinturão de Van Allen e alguns exemplos de orbitas LEO (baixa altitude) e GEO (geoestacionária) e das missões científicas *Manned Orbiting Laboratory* (MOL) e da Estação Espacial Internacional (ISS) [Moldwin 2008]

Basicamente um sistema de detecção pode ser dividido em três subsistemas: elemento sensor, discriminação do sinal e processamento. Quando uma partícula subatômica atravessa a matéria, dissipa energia em ionização e excitação de moléculas do material. Esse fenômeno serve de base para compor a maioria dos instrumentos de detecção. O elemento sensor se define como o subsistema responsável pela conversão da radiação em carga elétrica. O sinal elétrico gerado pelo elemento sensor geralmente é caracterizado como um pulso de corrente. O formato do mesmo transporta informações da interação da radiação com o detector. Assim, é necessário uma análise do pulso para obtenção de informação necessária. Para aplicações de estimação de energia e contagem de partículas (espectrometria de radiação) é comum uso de análise de pico do pulso PHA (Pulse Height Analysis), relacionado à energia depositada no material detector. A classificação de espécie de radiação incidente é normalmente realizada com uma discriminação do formato do pulso PSD (Pulse Shape Discrimination). Para ambas, existem metodologias analógicas, com associações de componentes eletrônicos para a formatação do pulso, e digitais, com algoritmos em software para mesma tarefa. Em aplicações de espectrometria clássica é comum abordagem analógica com o uso de um amplificador de carga em associação a um segurador de pico, um componente eletrônico que mantém o nível de tensão máxima lida em sua entrada. Numa abordagem digital, por exemplo, a mesma função pode ser feita ao digitalizar a saída do amplificador de carga e identificar os picos com algoritmos de máximos locais. Já as técnicas analógicas para o PSD são mais variadas na literatura, por exemplo, a passagem por zero, e métodos de comparação de carga, entre outros. Já com metodologia digital de PSD tem-se o uso de filtros digitais. Com as informações do pulso discriminadas é preciso processá-las para corresponder a grandezas físicas quantificáveis. Com o valor do pico pode-se estimar a



energia da radiação com uma simples função de proporcionalidade. Na contagem, soma-se o número de ocorrência desses picos. E com a discriminação temporal do PSD pode-se traçar domínios de classificação. Essa última metodologia tem sido facilitada com os avanços de algoritmos digitais de reconhecimento de padrões, como por exemplo, uma rede neural. De modo geral, as práticas digitais são mais compactas que as analógicas, dado que muitas funções dos componentes eletrônicos podem ser desempenhadas virtualmente.

Buscou-se na literatura descrever os princípios básicos de cada um dos principais subsistemas de um detector de radiação. Listou-se elementos sensores a base de silício e alguns cintiladores inorgânicos. Para formatação do sinal foram estudadas práticas analógicas, com uso de elementos eletrônicos, e alguns dos algoritmos digitais substitutos dos mesmos. Para o processamento dos dados foram descritos alguns algoritmos de classificação baseado em regras pré determinadas e com uso de aprendizado de máquina. Todos os métodos apresentados neste estudo, em cada um dos subsistemas, serão analisados através de simulações computacionais e com resultados obtidos em exemplos de aplicações na literatura. Serão descritos os parâmetros fundamentais de funcionamento das soluções estudadas, com destaque nos seguintes aspectos: faixa da taxa de contagens de partículas (deadtime); resolução de energia (FWHM - Full width at half maximum); eficiência de classificação de partículas (FoM - Figure of Merit); Campo de Visão; e complexidade (número de subsistemas e componentes). Para extração de tais pontos construiu-se uma plataforma virtual com o modelo de cada solução.

Desse modo, espera-se construir uma base de dados rígida e coerente com as principais característica e limitações de cada solução. Isso para auxiliar no processo de decisão de tecnologia para compor o instrumento de detecção de elétrons e prótons de alta energia espacial em questão.

Neste trabalho é apresentado as atividades iniciais do estudo de soluções para o detector em questão. Foi verificado as tecnologias mais comuns e viáveis para o ambiente espacial na literatura. A partir disto, criou-se modelos virtuais de seus principais elementos. Na sequência, agrupou-se esses modelos, dentro de uma plataforma criada no SIMULINK, onde obteve-se um conceito funcional de um instrumento detector genérico para que futuras análises possam ser realizadas.

2. Metodologia

A metodologia utilizada para análise de topologia do sensor teve início com a revisão de trabalhos sobre instrumentos detectores de elétrons e prótons de alta energia em algumas missões de clima espacial com objetivos semelhantes ao proposto. O conceito das tecnologias e técnicas de detecção usadas em cada uma são descritos e agrupados, quanto sua função, dada as seguintes classes: elemento sensor, formatação do sinal e processamento do sinal. As capacidades e limitações de cada solução para essas classes são descritas em duas formas. A primeira é orientada pelo resultado aplicação original, e a segunda é induzida por simulações de cenários chaves, definidos pelos parâmetros da missão, em modelos virtuais da solução estudada. O desenvolvimento desses modelos, com auxílio da plataforma MATLAB juntamente com o pacote SIMULINK, fazem parte do escopo deste trabalho. Os cenários são definidos em relação ao fluxo de partículas (intervalo de colisão, energia e espécies) observado em determinada órbita ou evento.



3. Resultados e Discussão

Por fim, é criada uma tabela comparativa (Tabela 1) com o resumo das topologias estudadas.

Tabela 1. Resumo dos trabalhos estudados sobre detectores espaciais de partículas de alta energia.

Satélite/ Missão	Duração	Objetivos	Órbita	Faixa de Energia	Ângulo de Visão	Elemento Sensor	Formatação do Sinal	Processamento do Sinal
SAMPEX/PET [Cook et al. 1993]	1992-2012	Prover estudos exploratórios de partículas energéticas (H, He e elétrons) de fonte solar e galáctica sobre o plano da eclíptica e sobre os polos solares.	Polar	1 a 30 MeV (elétrons) 20 a 300 MeV (prótons)	58°	Série de oito detectores de silício com derivação de Lítio, com espessura entre 2 a 15 mm	Amplificador de carga, discriminadores.	Lógica dos discriminadores, análise de altura de pulsos.
THEMIS/SST [Angelopoulos 2008]	2007-2010	Investigar causas de variações da aurora em subtempestades na magnetosfera.	Constelação equatorial.	25 a 6 MeV (íons) 25 a 1 MeV (elétrons)	36° x 20°	Sanduiche com três semicondutores. O central com 500 um de espessura. Os extremos com 300 um. Separação de íons e elétrons com campo magnético	Amplificadores de carga, discriminadores amplificadores formatadores.	Processamento digital, análise de altura de pulsos.
RBSP/REPT [Angelopoulos 2008]	2012-	Estudo de processos de aceleração e perda de partículas nas regiões do cinturão de radiação	550 Km - 30.050 Km inclinação 10° do equador	4 a 10 MeV 20 a 70 MeV	32°	Similar ao PET. Série de oito pares de detectores de silício.	Amplificadores de carga, discriminadores, formatador gaussiano de 5ª ordem.	Lógica dos discriminadores, lookup table, FPGA.
CSSWE/REPTile [Schiller et al. 2010]	2012	Medir partículas energéticas no ambiente próximo a Terra.	LEO (478 km - 786 km)	0.58 a 3.8 MeV (elétrons) 9 a 40 MeV (prótons)	-	Similar ao REPT. Série de quatro detectores de silício. O primeiro com 20 mm de diâmetro e os restantes 40 mm. Três detectores sanduiche de cintilação (CsI(Tl)/BGO) 0.3 cm e 1.7 de espessura, respectivamente, e ambos com 2.0 cm de diâmetro.	Amplificador de carga, amplificador proporcional, discriminadores	Lógica dos discriminadores, lookup table, μC
VERNOV/DRGE-3 [Panasyuk et al. 2016]	2014	Estudo de fenômenos transientes energéticos observados na atmosfera terrestre.	Heliosincrona (640 - 830 km)	0.2 a 15 MeV (elétrons) 4 a 100 MeV (prótons)	60°	Detetores de silício em série a um cintilador de CsI(Tl) e fotodiodo.	Tubo fotomultiplicador	Análise de altura de pulso.
Aalto-1/RADMON [Kestilä et al. 2013]	2017-	Mapear prótons e elétrons de orbita LEO.	Heliosincrona 500-900 km	0.7 a 10 MeV (elétrons) 10 a 200 MeV (prótons)	-	Detetores de silício em série a um cintilador de CsI(Tl) e fotodiodo.	Amplificadores de carga.	Processamento digital com FPGA, análise de altura de pulsos.

Iniciou-se primeiramente com o estudo de topologias indiretas de detecção, onde um cintilador de iodeto de cério ativado com tálio ($CsI(Tl)$) ilumina um fotodiodo. A Figura 3 mostra um desenho artístico conceitual do instrumento.

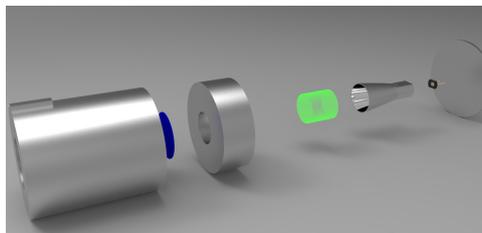


Figura 3. Desenho conceitual do instrumento com uso de cintilador de CsI(Tl) em associação a um fotodiodo.

Modelou-se o conjunto cintilador e fotodiodo como uma fonte de corrente controlada (para simular o comportamento da luminosidade do cintilador) em paralelo a um capacitor para simular a capacitância do fotodiodo. A equação 1 [He et al. 1993] apresenta uma forma analítica da variação da intensidade luminosa em função do tempo. Utilizou-se dessa equação, com o tempo de decaimento de 1us e intensidade máxima proporcional a energia selecionada



$$I(t, \tau_0) = \frac{N \cdot e_0 \cdot A \cdot e^{-t/\tau_0}}{\tau_0} \quad (1)$$

Sendo I a corrente, t o tempo de simulação, N o numero de fótons gerados, A a eficiência do fotodiodo, e_0 carga do elétron e τ_0 o tempo de decaimento. A Figura 4 foi o resultado de uma simulação realizada com energia de 6 MeV, 52 fótons por MeV e com tempo de decaimento de $1 \mu s$.

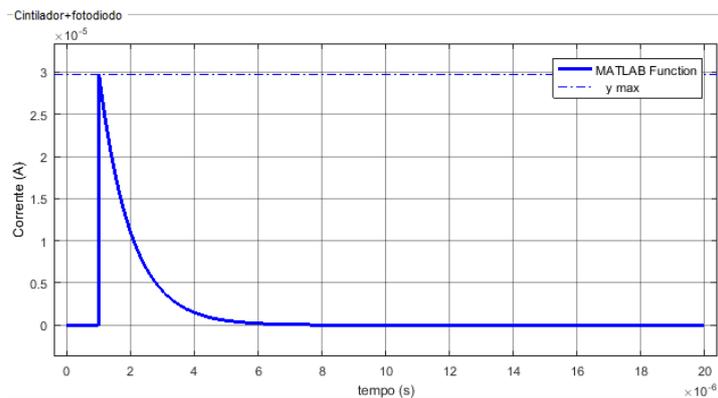


Figura 4. Formato da corrente do conjunto cintilador+fotodiodo.

A pre amplificação (PA) é feita com um amplificador sensível a carga com constante de tempo de $11 \mu s$ e amplificação de 1000, Figura 5. A capacitância do fotodiodo simulado é de 700 pF .

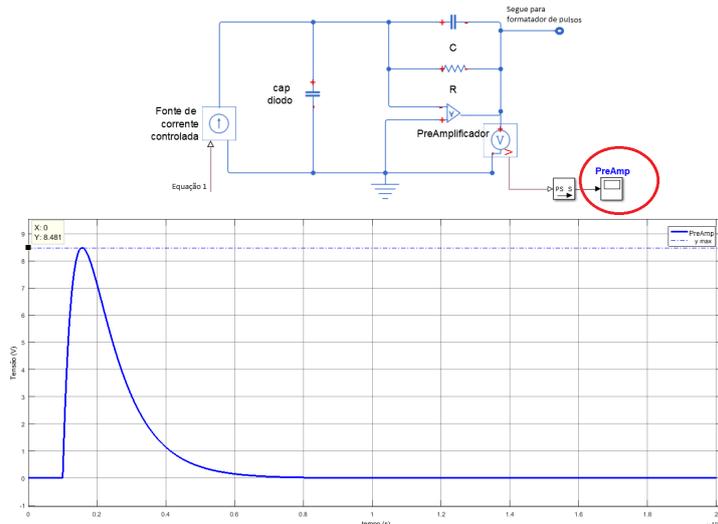


Figura 5. Fonte de corrente controlada em paralelo a capacitância do fotodiodo e pre amplificador. Abaixo o formato de tensão de saída em função do tempo

A seguir, o pulso integrado pelo PA é então submetido a uma cascata de filtros que facilitarão sua aquisição e análise. [F. Knoll 2010] Usou-se um formatador de pulso do tipo gaussiano ($CR - RC^4$) com constante de tempo de $440 \mu s$ (Capacitor de 22 pF e resistor de $20 \text{ k}\Omega$, Figura 6. O valor de pico do pulso do PA é relativo a integral da carga depositada no fotodiodo pela luminescência do cintilador. Dessa forma é possível também estimar a deposição de energia da partícula incidente no próprio cintilador.

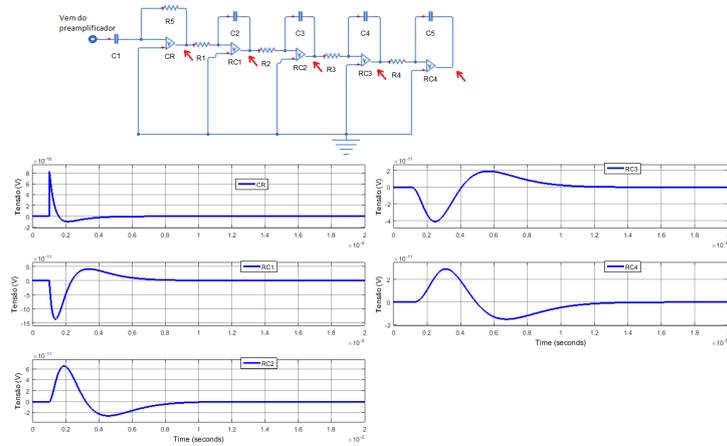


Figura 6. Formatador de pulso gaussiano com rede de filtros $CR - RC^4$

A parte de aquisição de dados é modelada como uma função que amostra dados do pulso em intervalos definidos pelo usuário. A função é habilitada por um *trigger* quando o valor de tensão do pulso ultrapassa um limite (0.5 V). Assim consegue-se digitalizar somente a região do pulso que contém informação útil. Na (Figura 7) é possível observar esse comportamento, onde somente os valores de tensão subentendidos na faixa de nível alto do sinal de gatilho são adquiridos.

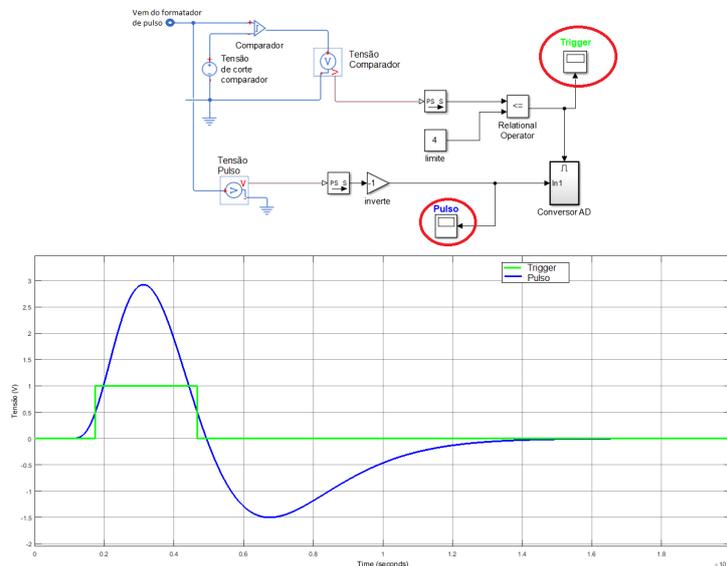


Figura 7. Sinal para controle da aquisição

Por fim criou-se um modelo de detector genérico (Figura 8). Trata-se de um elemento sensor baseado em um cintilador de CsI(Tl) associado a um fotodiodo que fornece sinal para um amplificador de carga. Adicionou-se um amplificador proporcional para elevar o nível de tensão do pulso a um valor comum a componentes eletrônicos digitalizadores. Esse último trata-se de um conversor A/D de 10 bits operando a 10 Mhz. O pulso digitalizado é então processado por rotinas de software desenvolvidas na plataforma de programação do MATLAB.

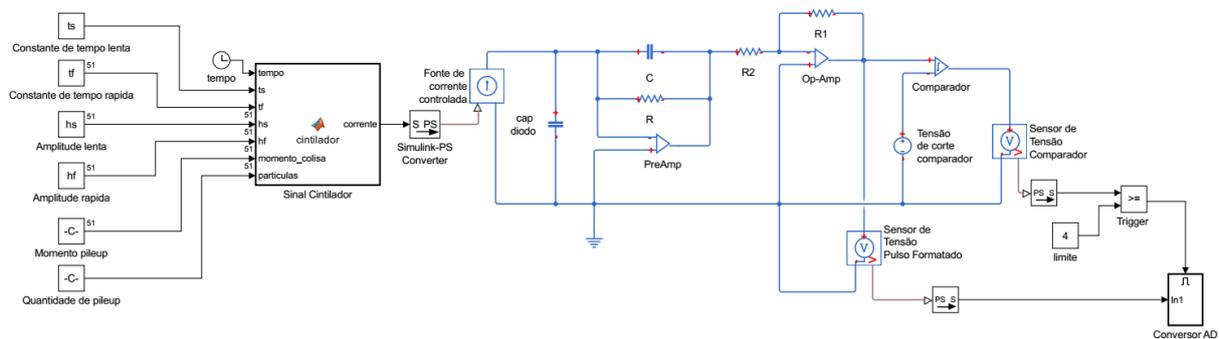


Figura 8. Esquema do modelo no SIMULINK.

4. Conclusão

De forma geral observa-se que existem elementos similares nos instrumentos das missões observadas. O que mais destaca-se, pela variadas metodologias, é o elemento sensor. Tanto no material quanto em sua montagem, disposição e agrupamento. Vê-se dois elementos comuns, o semiconductor sensível a radiação e cintiladores. Ambos geram sinais semelhantes de modo que a eletrônica necessária para sua leitura são similares, como o caso do pré-amplificador de carga, presente em todos instrumentos estudados. Os elementos sensores são dispostos em diferentes configurações em cada uma das soluções, o que possibilita diferentes análises da radiação incidente. Essa particularidade portanto reflete no processamento dos sinais subsequentes. Contudo, os principais parâmetros de análise dos sinais dos elementos sensores são: seus gatilhos, ou seja, o momento da interação da radiação com elemento sensor; o nível de tensão do pulso; e formato (tempo de subida, passagem por zero, entre outros). A próxima etapa do trabalho irá abordar o desenvolvimento dos conceitos de solução estudadas e na extração da de sua resposta a simulação do ambiente espacial em uma determinada órbita.

Agradecimentos: Agradecemos a CAPES e ao INPE pelos recursos oferecidos.

Referências

- Angelopoulos, V. (2008). The THEMIS mission. *Space Sci. Rev.*, 141(1-4):5–34.
- Boyd, A. J., Turner, D. L., Reeves, G. D., Spence, H. E., Baker, D. N., and Blake, J. B. (2018). What Causes Radiation Belt Enhancements: A Survey of the Van Allen Probes Era. *Geophysical Research Letters*, 45(11):5253–5259.
- Cook, W. R., Cummings, A. C., Cummings, J. R., Garrard, T. L., Kecman, B., Mewaldt, R. A., Selesnick, R. S., Stone, E. C., Baker, D. N., von Rosenvinge, T. T., Blake, J. B., and Callis, L. B. (1993). PET: A Proton/Electron Telescope for Studies of Magnetospheric, Solar, and Galactic Particles. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 31(3):565–571.
- F. Knoll, G. (2010). *Radiation Detection and Measurement*. John Wiley & Sons, 4th edition.
- Fennell, J. F., Blake, J. B., Claudepierre, S., Mazur, J., Kanekal, S., O'Brien, P., Baker, D., Crain, W., Mabry, D., and Clemmons, J. (2016). Current energetic particle sensors. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 121(9):8840–8858.
- He, Z., Bird, A., and Ramsden, D. (1993). A ratio pulse-shape discriminator. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 336(1-2):236–245.



- Kestilä, A., Tikka, T., Peitso, P., Rantanen, J., Näsilä, A., Nordling, K., Saari, H., Vainio, R., Janhunen, P., Praks, J., and Hallikainen, M. (2013). Aalto-1 nanosatellite – technical description and mission objectives. *Geosci. Instrumentation, Methods Data Syst.*, 2(1):121–130.
- Moldwin, M. B. (2008). *An Introduction to Space Weather*. Cambridge University Press, New York.
- Panasyuk, M., Svertilov, S., Bogomolov, V., Garipov, G., Balan, E., Barinova, V., Bogomolov, A., Golovanov, I., Iyudin, A., Kalegaev, V., et al. (2016). Relec mission: Relativistic electron precipitation and the study on-board small spacecraft. *Advances in Space Research*, 57(3):835–849.
- Schiller, Q. G., Mahendrakumar, A., and Li, X. (2010). REPTile : A Miniaturized Detector for a CubeSat Mission to Measure Relativistic Particles in Near-Earth Space. *USU Conference on Small Satellites*, pages SSC10–VIII–1.
- Schrijver, C. J. and Siscoe, G. L. (2010). *Heliophysics: Space Storms and Radiation: Causes and Effect*.