



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/05.29.14.24-TDI

**PROPOSTA CONCEITUAL DE UM INSTRUMENTO
DETECTOR DE ELÉTRONS E PRÓTONS DE ALTA
ENERGIA PARA APLICAÇÃO EM CUBESATS
BASEADO EM SOLUÇÕES COMPACTAS E DE BAIXO
CUSTO**

Felipe Oliveira Tavares

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais, orientada pelos Drs. Livia Ribeiro Alves, e Silvio Manea, aprovada em 07 de junho de 2019.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3TCQM92>>

INPE
São José dos Campos
2019

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GBDIR)

Serviço de Informação e Documentação (SESID)

CEP 12.227-010

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/7348

E-mail: pubtc@inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA Nº 176/2018/SEI-INPE):

Presidente:

Dra. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CGCPT)

Membros:

Dra. Carina Barros Mello - Coordenação de Laboratórios Associados (COCTE)

Dr. Alisson Dal Lago - Coordenação-Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CGCEA)

Dr. Evandro Albiach Branco - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (COCST)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia e Tecnologia Espacial (CGETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação-Geral de Observação da Terra (CGOBT)

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação - (CPG)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Ivone Martins - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

Cauê Silva Fróes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/05.29.14.24-TDI

**PROPOSTA CONCEITUAL DE UM INSTRUMENTO
DETECTOR DE ELÉTRONS E PRÓTONS DE ALTA
ENERGIA PARA APLICAÇÃO EM CUBESATS
BASEADO EM SOLUÇÕES COMPACTAS E DE BAIXO
CUSTO**

Felipe Oliveira Tavares

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais, orientada pelos Drs. Livia Ribeiro Alves, e Silvio Manea, aprovada em 07 de junho de 2019.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3TCQM92>>

INPE
São José dos Campos
2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Tavares, Felipe Oliveira.

T197p Proposta conceitual de um instrumento detector de elétrons e prótons de alta energia para aplicação em CubeSats baseado em soluções compactas e de baixo custo / Felipe Oliveira Tavares. – São José dos Campos : INPE, 2019.

xxiv + 114 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/05.29.14.24-TDI)

Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Engenharia e Gerenciamento de Sistemas Espaciais) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2019.

Orientadores : Drs. Livia Ribeiro Alves, e Silvio Manea.

1. Detector de radiação. 2. Satélite clima espacial. 3. Cinturão de Van Allen. 4. Espectrometria de radiação. I.Título.

CDU 629.7.054.3:629.78



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aluno (a): *Felipe Oliveira Tavares*

Título: "PROPOSTA CONCEITUAL DE UM INSTRUMENTO DETECTOR DE ELÉTRONS E PRÓTONS DE ALTA ENERGIA PARA APLICAÇÃO EM CUBESATS BASEADO EM SOLUÇÕES COMPACTAS E DE BAIXO CUSTO"

Aprovado (a) pela Banca Examinadora em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de **Mestre** em **Engenharia e Tecnologia Espaciais/Eng. Gerenc. de Sistemas Espaciais**

Dr. José Osvaldo Rossi



Presidente / INPE / São José dos Campos - SP

() Participação por Video - Conferência

Aprovado () Reprovado

Dr. Silvio Manea



Orientador(a) / INPE / São José dos Campos - SP

() Participação por Video - Conferência

Aprovado () Reprovado

Dra. Livia Ribeiro Alves



Orientador(a) / INPE / São José dos Campos - SP

() Participação por Video - Conferência

Aprovado () Reprovado

Dr. Luis Eduardo Antunes Vieira



Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP

() Participação por Video - Conferência

Aprovado () Reprovado

Dr. Odair Lelis Gonçalez



Convidado(a) / IEAv/DCTA / São José dos Campos - SP

() Participação por Video - Conferência

Aprovado () Reprovado

Este trabalho foi aprovado por:

() maioria simples

unanimidade

“É fundamental diminuir a distância entre o que se diz e o que se faz, de tal forma que, num dado momento, a tua fala seja a tua prática.”

PAULO FREIRE

A minha família

AGRADECIMENTOS

Sempre agradeço primeiramente meus pais, que a todo momento se esforçaram para garantir que uma educação libertadora estivesse presente em minha vida. Tudo empacotado em um ambiente de carinho, amor e muitas comidas deliciosas.

A meus mestres, em toda jornada escolar, que me ensinaram a ver o mundo de forma mais crítica. Espero um dia retribuir, seguindo seus exemplos, com a nova geração de alunos.

Ao INPE que me possibilitou realizar este trabalho e forneceu um lugar agradável e confortável para estudos.

Ao Departamento de Geofísica (Alisson, Luis, Filomena) e de Engenharia e Tecnologias Espaciais do INPE, pelo apoio, sua infraestrutura, empenho e dedicação na capacitação científica de seus alunos.

Ao grupo de estudo do cinturão de radiação (Lívia, Lígia, Paulo, Vitor, Marlos, Cláudia) pelo apoio e motivação.

Agradeço minhas colegas de sala Karen, Ana, Grazi e Vinícius que garantiram minha sanidade mental com as descontraídas pausas para o café e almoço.

A minha companheira (Jenny) por todo carinho, afeto, cumplicidade e compreensão.

À CAPES pelo apoio financeiro para realização deste trabalho.

RESUMO

Desde a descoberta dos cinturões de radiação da Terra, as comunidades científicas e tecnológica realizaram muitos esforços para detectar partículas energéticas em aplicações de clima espacial. Além da detecção, outra questão intrigante é caracterizar essa região quanto o espectro de espécies de partículas existentes e seu poder energético. Neste trabalho é apresentado uma solução para esse problema: revisitou-se a topologia típica de detecção, baseada em detector de estado sólido do tipo cristal cintilador $CsI(Tl)$ associado a um fotodiodo para propor um conceito de detecção melhorado, adequado para plataformas *CubeSat*. O sinal de luminescência, emitido pela incidência de radiação no $CsI(Tl)$, é coletado por um fotodiodo, e o pulso de corrente resultante transporta informações sobre o evento de origem. A energia total depositada no cristal, pela interação da partícula incidente, e a contagem de eventos é realizada pela análise da altura máxima do pulso (*Pulse Height Analysis* - PHA). As espécies são identificadas pela observação do formato do pulso (*Pulse Shape Analysis* - PSA). O sistema eletrônico proposto é composto por um amplificador de carga, um amplificador linear e um conversor analógico-digital. Para o PSA, é proposto um novo algoritmo baseado em rede neural artificial do tipo perceptron multicamadas, capaz de classificar a radiação incidente pelo reconhecimento de padrões do formato dos pulsos digitalizados. Este novo método é avaliado através da reconstrução virtual do sinal de luminescência do cintilador ao ser atingido por radiação. São considerados vários cenários de incidência de partículas, parametrizadas em espécies (prótons, elétrons e partículas alfas de fundo), energia e intervalos de colisão. O modelo mostra-se capaz de identificar, contar e estimar a energia de elétrons de 1-10 MeV e prótons de 15-50 MeV nas simulações realizadas. Foram consideradas de colisões de partículas no cintilador, separados no tempo por 20 ms, os resultados apresentam uma taxa de sucesso de 99% para classificação da espécie da partícula, mesmo com partículas alfas de fundo, e um desvio padrão de menos de 1 MeV para a estimativa de energia.

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

CONCEPTUAL PROPOSAL OF A HIGH ENERGY ELECTRON AND PROTON DETECTOR INSTRUMENT FOR CUBESATS APPLICATION BASED ON COMPACT AND LOW COST SOLUTIONS

ABSTRACT

Since the discovery of Earth's radiation belts, the scientific and technological communities have put forward many efforts to detect energetic particles for space weather applications. Besides the detection, another puzzling issue is to classify the particles species, energy power, and spectra. As a solution for that goal, the typical solid-state based topology using CsI(Tl) scintillator crystal associated with a photodiode is revisited, and we propose an improved conceptual detector design suitable for small satellites platform. The CsI(Tl) luminescence signal is collected by a photodiode and the resultant current pulse carries information about particle event hit, energy (identified with Pulse Height Analysis (PHA)), and species (identified with Pulse Shape Analysis (PSA)). The electronic level is composed by a charge amplifier, a linear amplifier, and an analog-to-digital converter. For PSA, it is proposed a new algorithm based on a multi-layer *perceptron* neural network, which allows classifying the incident radiation by pattern recognition of pulse shape. This new method is evaluated using a reconstructed signal of the luminescence yield by the scintillator. Several particles hit scenarios, parameterized in species (proton, electrons, and background alpha particles), energy and collision intervals are considered. The model is able to identify, count and estimate the energy of electrons of 1-10 MeV and protons of 15-50 MeV. Particles collisions at the scintillator are time-separated by $20\mu s$, with a success rate of 99% for particle classification, even with background alpha particles, and a standard deviation of less than 1 MeV for the energy estimation.

Keywords: Radiation detector. Satellite. Space Radiation. Van Allen belt. Neural Network.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1.1 Esquema ilustrativo do formato dos cinturões de radiação segundo dados pelas sondas Van Allen Probes A e B. Os dados dessas sondas permitiram a descoberta de um terceiro cinturão de radiação transiente entre os dois externos já esperados, mostrado nesta figura.	3
1.2 Medida do fluxo de elétrons relativísticos obtida pelas sondas Van Allen Probes A e B no período de 01/01/2017 até 27/12/2017.	4
2.1 Comparação entre AP8 e AP9.	10
2.2 Características da radiação espacial de diferentes fontes, e seus efeitos em satélites.	13
2.3 Classificação de satélites miniaturizados quanto a massa, e diferentes montagens com a plataforma CubeSat. O CubeSat de 1U é considerado um nanosatélite.	16
3.1 Detector em modo de pulso. Circuito de leitura simplificado por uma capacitância e resistência	21
3.2 Relação entre carga depositada no sensor e relativa resposta em tensão de elemento de leitura RC.	22
3.3 Diferentes formas de apresentar graficamente o espectro de altura de pulsos.	24
3.4 Ilustração do conceito de fluxo de partículas.	27
4.1 Ilustração destacando as principais estruturas solares (núcleo, zona de radiação e convecção, fotosfera, cromosfera e coroa) e algumas secundárias (prominências, flares, buraco coronal, manchas solares).	33
4.2 Fotografia de uma mancha solar.	36
4.3 Gráfico com quantidades de manchas solares identificadas em quase 3 séculos de observações.	38
4.4 Fotografias do Sol tiradas pelo satélite SOHO destacando as emissões de radiação ultravioleta (esquerda) e as manchas solares (direita) em 9 anos de atividade (2002-2010).	39
4.5 Fotografias do Sol no momento de um evento CME.	41
4.6 Fotografias do Sol no momento de um evento Flare.	42
4.7 Formato em espiral da ejeção do plasma solar.	45
4.8 Formato "saia de bailarina" da heliosfera.	46
4.9 Analogia do campo dipolo magnético da Terra como um Ímã.	47

4.10	Modelo artístico destacando as regiões da magnetosfera. As correntes elétricas que fluem na magnetosfera são dadas pelas setas escuras	48
4.11	Esquema ilustrando a interação magnética do vento solar com a magnetosfera.	50
4.12	Foto aurora no hemisfério Norte tirada pelo instrumento PIXIE a bordo do satélite POLAR.	52
4.13	Gráfico ilustrativo com o comportamento do índice DST em uma tempestade geomagnética comum com destaque de suas fases.	53
4.14	Distribuição omnidirecional, do fluxo de partículas integrado.	56
5.1	Esquema da montagem do detector HEEF, com destaque a disposição dos detectores e características do colimador.	59
5.2	Esquema da montagem do detector PROTEL, com maior destaque aos detectores e a colimação.	62
5.3	Esquema eletrônico do detector PROTEL.	63
5.4	Esquema de disposição dos detectores de estado sólido do instrumento PET.	64
5.5	Esquema ilustrativo do detector HIST, a bordo do satélite POLAR. A coleta dos fótons de cintilação é feita por um tubo fotomultiplicador com proporções muito expressivas ao restante do instrumento.	67
5.6	Esquema ilustrativo do detector REPT, a bordo do satélite RBSP.	69
5.7	Esquema funcional dos subsistemas de detecção no instrumento REPT. É mostrado com mais detalhes os sistemas eletrônicos necessários para o funcionamento do instrumento.	70
5.8	Esquema ilustrativo do instrumento REPTile. (1)Discos detectores de silício; (2) escudo de Tântalo; (3) escudo de Alumínio; (4) pino guia para alinhamento; (5) janela de Berílio; (6) colimadores de Tântalo.	72
5.9	Esquema ilustrativo do instrumento RADMON. (a) Em amarelo a folha de Alumínio para filtrar partículas de baixa energia, seguido de uma folha de Silício (em vermelho), o cintilador de CsI (vermelho) e em ciano o fotodiodo. (b) Renderização de uma visão externa do instrumento.	73

6.1	Esquema ilustrativo das unidades propostas para construção do modelo funcional do detector. (i) O cintilador de cristal CsI(Tl) recebe a partícula atingida e produz fótons que atinge o fotodiodo. (ii) O sinal de corrente do fotodiodo é integrado pelo <i>PreAmp</i> , amplificado pelo <i>GainAmp</i> e o conversor "A/D" digitaliza o sinal. (iii) A unidade de análise de sinal é feita totalmente digital, com um PHA para estimar a energia da partícula, PSA para determinação da espécie. A estimativa de energia e contagem de elétrons e prótons é registrada em um histograma.	76
6.2	Dados das componentes da Equação 6.1 que descrevem a luminescência do cintilador CsI(Tl)(Equation 6.1) adaptado de (BENRACHI et al., 1989). (a) Variação do tempo de decaimento rápido t_f e (b) a razão de intensidade h_s/h_f vs energia de partículas diferentes. As linhas contínuas representam a função de ajuste desenvolvida com pontos de dados experimentais de (BENRACHI et al., 1989). Essas funções são usadas para construir os sinais do cintilador de luminescência no modelo do detector proposto. Uma pequena margem da função de ajuste é considerado (linhas de traço) para avaliar a resposta do detector a possíveis dispersões de entrada.	79
6.3	Corrente de saída do modelo de fotodiodo como resposta a simulação de luminescência do cintilador produzido pela interação de um elétron (vermelho), próton (azul) e alfa (preto) com 15 MeV no instante $1\mu s$. . .	82
6.4	(a) Formato do sinal de pulso do detector na saída do amplificador linear <i>GainAmp</i> para o caso de três partículas diferentes com 15 MeV, atingindo o cintilador no instante $1\mu s$. (b) O mesmo sinal normalizado com destaque das regiões de proximidade do pico.	84
6.5	Posições dos valores amostrados para compor o vetor características usado no classificador neural. Cinco valores são tomados nas posição de índice: $[p - 5, p - 2, p + 5, p + 10, p + 20]$, o qual p é a posição de pico nas amostras de pulso do vetor digitalizado. O vetor de características é normalizado em relação ao seu pico. O pulso atual é obtido com uma simulação do detector MV (modelo virtual) para um caso de elétrons de 15 MeV.	88

6.6	Esquema da arquitetura da rede neural usada para classificar as partículas. Os valores das características ($i= 1$ a 5) são entradas de todos ($j = 1a2$) neurônios na camada oculta, que simboliza duas sequencias de operações:(i) soma das entradas, multiplicadas um um peso (W_{ij}), com uma dada referencia (<i>bias</i> B_j); e (ii) submeter o resultado anterior a uma função de ativação (no caso uma função sigmoide $f_{1,j}$) com saída limitada entre 0 e 1. A camada de saída tem neurônios com comportamento semelhante, no entanto, a resposta da função de ativação fornece a estimativa de classe correspondente. Esta função encontra o maior valor de entrada e atribui a saída de mesmo índice o valor 1, e 0 para os demais. A classificação é definida pela índice onde existe o valor 1, com correspondência ao vetor [elétron próton alfa].	89
6.7	Esquema resumido de processos da unidade de análise criada.	90
6.8	Esquema ilustrativo da unidade de colimação e proteção de radiação proposta.	91
7.1	Esquema resumido de procedimentos necessários para executar uma simulação do modelo criado. Primeiro tem-se a entrada de parâmetros do feixe de radiação a ser simulado, seguido pelo cálculo das componentes do cintilador para produção de seu sinal luminoso. Dentro da plataforma SIMULINK o modelo os estados do são atualizados em cada passo de tempo. Finalizada o tempo total de simulação, são executados rotinas para coleta de dados e aplicação dos algoritmos da unidade de análise.	94
7.2	Resposta do modelo de detecção para uma simulação incidência de 4950 partículas, igualmente distribuídas em 50 canais de energia. Essas 99 partículas por canal são divididas em: (a) elétron, (b) próton e (c) alfa. Em azul um histograma com as frequências de contagem de cada canal e vermelho o desvio padrão da estimativa de energia. Na partícula alfa, para energias acima de 38 MeV, o componente ADC satura mantendo valor máximo constante, sem portanto, desvio padrão.	99

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Tabela evidenciando a relação entre a alta taxa de fluxo de elétrons e prótons e a ocorrência de anomalias em satélites.	14
4.1 Classificação de tempestades quanto ao índice máximo DST.	54
5.1 Característica dos canais de detecção do HEEF.	60
5.2 Tabela com as faixas de energia de resposta do instrumento REPTile depois de recalibração dado o mal funcionamento de um detector.	71
7.1 Tabela da descrição dos parâmetros de entrada de uma simulação do modelo de detector proposto para o caso da incidência de 10 partículas no cintilador	95
7.2 Matriz de confusão. As tabelas apresentam quatro casos de simulações diferentes, com intervalos de tempo de incidência (a) 5μ , (b) $10\mu s$, (c) $15\mu s$, and (d) $20\mu s$. A soma de cada linha é o total de partículas desta classe identificadas pelo algoritmo implementado. A soma de cada coluna é o total real das partículas simuladas dessa classe. Na tabela (d), linha 1/coluna 1 observa-se que das 329 partículas simuladas de elétrons todas foram classificadas corretamente como elétrons. Entretanto das 326 partículas simuladas como prótons (soma da coluna 2), 6 dessas foram classificadas como elétrons (linha 1/coluna2).	98

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CMEI	–	Coronal Mass Ejection - Ejeção de Massa Coronal
SEP	–	Super Energetic Particles - Partículas Super Energéticas
DST	–	Disturbance Storm-Time - Distúrbio Tempestade-Tempo
AE	–	Geomagnetic Auroral Electrojet - Eletrojato Auroral Geomagnético
SPENVIS	–	SPace ENVironment Information System - Sistema de Informação do Ambiente Espacial
LET	–	Linear Energy Transfer - Transferência Linear de Energia
SEE	–	Single Event Effects - Eventos de efeito Único
DDD	–	Displacement Damage Dose - Dose de Dano por Deslocamento
TID	–	Total Ionizing Dose - Dose Total Ionizante
GCR	–	Galactic Cosmic Rays - Raios Cósmicos Galáticos
INPE	–	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
ESA	–	European Space Agency - Agência Espacial Europeia
NASA	–	National Aeronautics and Space Administration - Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço
PHA	–	Pulse Height Analysis - Análise de Altura de Pulso
PSA	–	Pulse Shape Analysis - Análise de Formato de Pulso
FWHM	–	Full Width at Half Maximum - Largura à Meia Altura
FoM	–	Figure of Merit - Figura de Mérito
TAC	–	Time-to-Amplitude Converter - Conversor Tempo para Amplitude
FPGA	–	Field Programmable Gate Array - Matriz de Portas Programáveis em Campo
PA	–	Pré-Amplificador
FD	–	Fotodiodo
MV	–	Modelo Virtual
CRRES	–	The Combined Release and Radiation Effects Satellite - Satélite de Efeitos Combinados da Radiação
PROTEL	–	PROton TELEscope
HEEF	–	High Energy Electrons Fluxometer - Fluxômetro de Elétrons de Alta Energia
SAMPEX	–	Solar, Anomalous, and Magnetospheric Particle Explorer - Explorador de Partículas Anômalas e da Magnetosfera
PET	–	Particle Energetic Telescope - Telescópio de Partículas Energéticas
HIST	–	High Sensitivity Telescope - Telescópio de Alta Sensibilidade
RBSP	–	Radiation Belt Storm Probes - Sondas de Tempestades no Cinturão de Radiação
REPT	–	The Relativistic Electron-Proton Telescope - Telescópio de Elétron-Próton Relativísticos
CSSWE	–	Colorado Student Space Weather Experiment - Experimento de Clima Espacial de Estudantes do Colorado

- REPTile – The Relativistic Electron and Proton Telescope
Integrated Little Experiment -
Pequeno Experimento Integrado Telescópio de
Elétron-Próton Relativísticos
- RADMON – RADIation MONitor - Monitor de Radiação

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	5
1.2 Metodologia	6
2 MOTIVAÇÃO	9
2.1 Risco do Ambiente Radiativo em Dispositivos Espaciais	10
2.2 Satélites Miniaturizados para Monitoramento do Clima Espacial	15
3 DETECTORES DE RADIAÇÃO	19
3.1 Espectro de Altura de Pulso	23
3.2 Eficiência	24
3.3 Fluxo de Partículas	26
3.4 Tempo Morto	28
4 CLIMA ESPACIAL	29
4.1 Física de Plasma	29
4.2 O Sol	30
4.2.1 Estruturas	31
4.2.2 Campo Magnético Solar	34
4.3 Ejeção de Massa Coronal	39
4.4 Flares	41
4.5 Partículas Super Energéticas	43
4.6 Vento Solar	43
4.7 Magnetosfera Terrestre	46
4.8 Tempestades Geomagnéticas	51
4.9 SubTempestades Geomagnéticas	54
4.10 Aprisionamento e Fluxo de Partículas na Magnetosfera	54
5 INSTRUMENTOS ESPACIAIS DE DETECÇÃO DE RADIAÇÃO 57	
5.1 CRRES/(PROTEL e HEEF)	57
5.1.1 HEEF	57
5.1.2 PROTEL	60
5.2 SAMPEX/PET	63

5.3	POLAR/HIST	65
5.4	RBSP/REPT	67
5.5	CSSWE/REPTile	71
5.6	Aalto-1/RADMON	72
6	DESENVOLVIMENTO	75
6.1	Unidade Sensora	77
6.1.1	Cintilador de CsI(Tl)	77
6.1.2	Fotodiodo	80
6.2	Unidade de Formatação	82
6.3	Unidade de Análise	83
6.4	Unidade de Colimação e Proteção	90
7	SIMULAÇÕES	93
7.1	Parâmetros da Simulação	94
7.2	Treinamento da Rede Neural	95
7.3	Resultados das Simulações	95
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS	101
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103

1 INTRODUÇÃO

No espaço próximo a Terra existem regiões com alta concentração de partículas carregadas, majoritariamente elétrons e prótons numa grande faixa de energia, essas regiões são também chamadas de cinturões de radiação ou de Van Allen (devido ao cientista responsável por sua descoberta). A presença do cinturão é consequência da interação do campo magnético da Terra com o fluxo de plasma de diversas fontes, entre elas a ionosfera e o vento solar. Um dos fenômenos observáveis mais conhecidos dessa interação são as magníficas auroras boreais, efeito provocado pela emissão luminosa da excitação de elementos na atmosfera, em regiões de alta latitude, por partículas vindas do Sol que são desviadas pelo campo magnético terrestre e atingem a região dos polos magnéticos da Terra. Os mecanismos físicos que dão origem a esses fenômenos podem fornecer condições para que as partículas permaneçam armadilhadas em movimento no espaço próximo a Terra e não se precipitem. Esse aprisionamento define os cinturões de radiação ou de Van Allen. A radiação presente nesse meio apresenta riscos a atividades humanas espaciais, entre algumas, podem ocasionar falhas em dispositivos eletrônicos (ECOFFET, 2013), danificar componentes, alterar órbitas de satélites artificiais e até mesmo ser nocivo à saúde de astronautas.

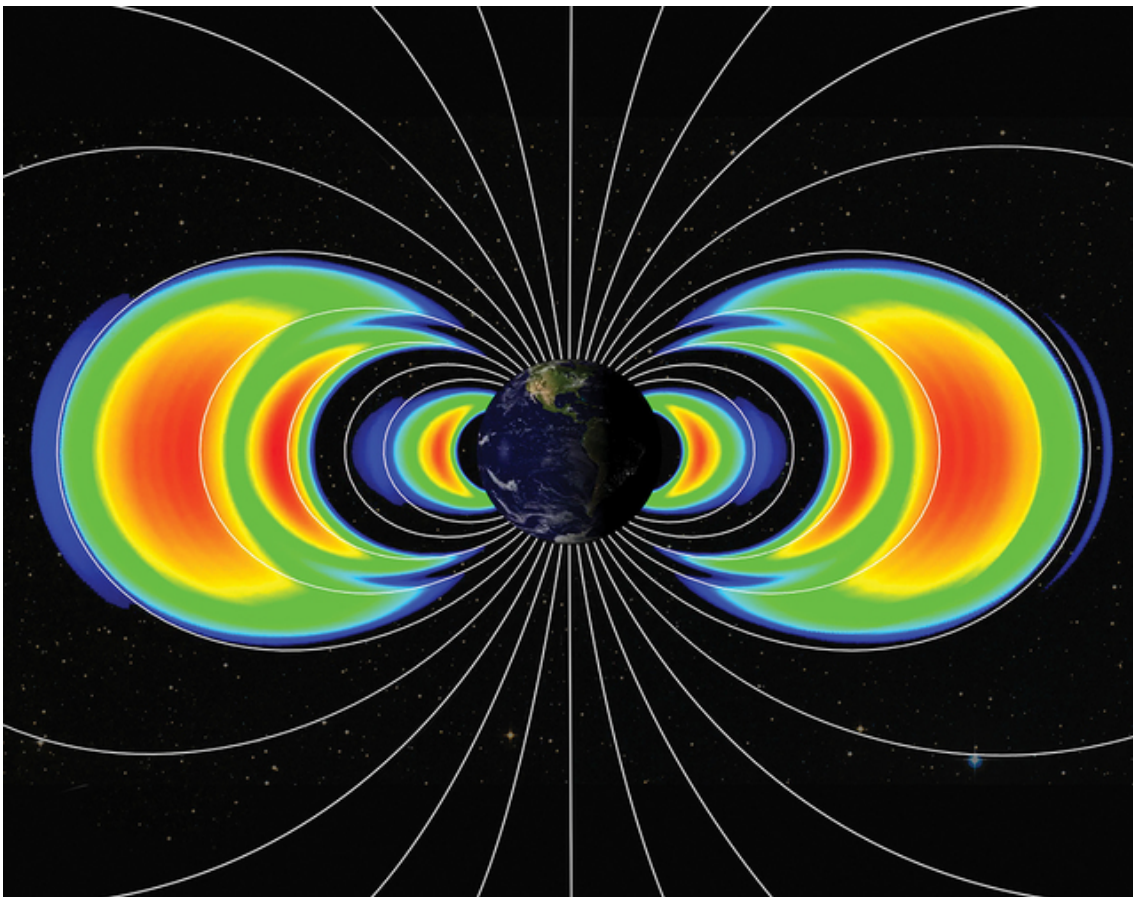
Nas últimas décadas, diversos setores da sociedade tem utilizado sistemas tecnológicos que utilizam de dados de satélites. Sistemas de geolocalização utilizam sinais de satélites em órbita e estão presentes em vários dispositivos do cotidiano sendo essenciais como guias em grandes cidades. Servidores de internet usam satélites para aumentar a taxa de transmissão de dados. Diversas aplicações de sensoriamento remoto utilizam dispositivos orbitais, seja para auxílio na agricultura (ONOJEGHUO et al., 2018), no monitoramento ambiental (INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE), 2018), no acompanhamento de desastres naturais (KAKU, 2019), ou entre muitas outras. Além disso, satélites com instrumentos científicos em órbita, tais como detectores de partículas, imageadores da superfície da Terra e telescópios são mais eficientes pela falta de atmosfera, assim conseguimos visualizar melhor o espaço com detalhes nunca antes disponíveis (SPITZER JUNIOR, L., 1990). Da perspectiva econômica, para manter tais dispositivos operantes por períodos longos é necessário assegurar a correta descrição do ambiente onde operam, tornando imprescindível o estudo do cinturão de radiação. Nas primeiras fases do projeto de uma missão espacial, engenheiros utilizam modelos virtuais que tentam prever o ambiente radiativo em que o sistema estará inserido e quais efeitos no dispositivo projetado. Desse modo, é possível planejar ações mitigadoras para eventuais falhas, o que aumenta a

confiabilidade da missão e diminui o risco de ser perder o investimento.

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 as várias perturbações do campo magnético terrestres devido a eventos solares intensos responsáveis por causar tempestades geomagnéticas.

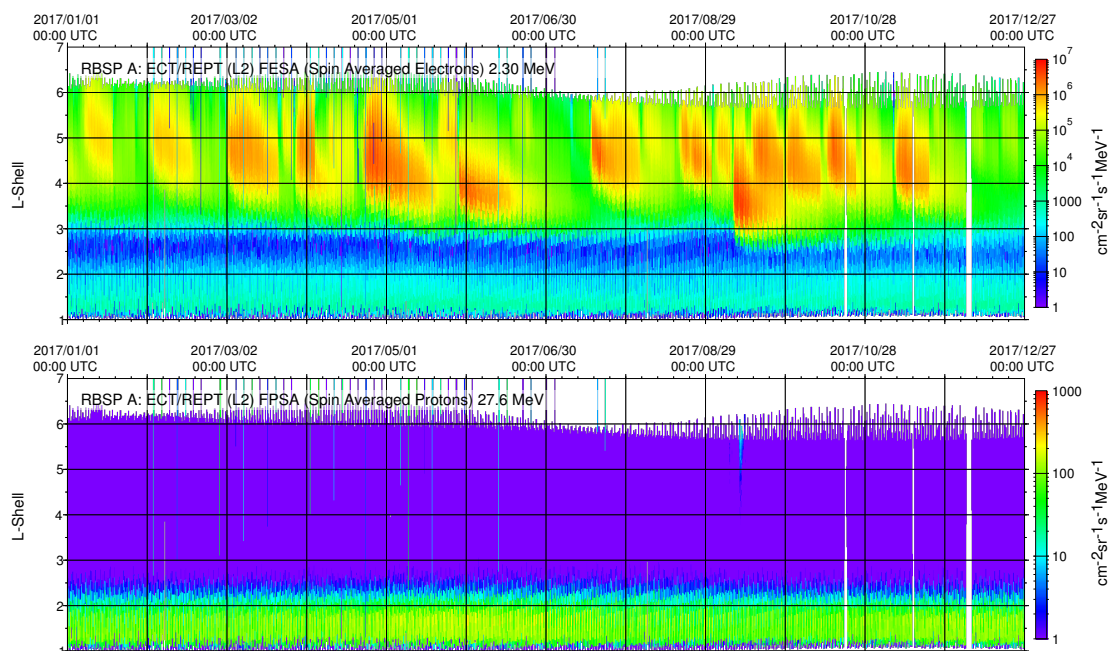
Desde o início da era dos satélites, inúmeras missões espaciais tiveram como um dos seus objetivos caracterizar a radiação espacial observada na região da magnetosfera interna. Dentre essas missões, a Explorer I foi responsável por fornecer os dados que permitiram a descoberta dos cinturões de radiação, 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 dos cinturões de Van Allen, a missão Van Allen Probes (KIRBY et al., 2012). A Figura 1.1 ilustra o atual entendimento do formato dos cinturões de radiação. Essa missão dispõe de duas sondas idênticas que operam os mesmos instrumentos para medidas na região dos cinturões de radiação. A Figura 1.2, mostra um exemplo da variabilidade do fluxo de elétrons relativísticos medidos pelas sondas Van Allen Probes A e B durante um período 6 dias.

Figura 1.1 - Esquema ilustrativo do formato dos cinturões de radiação segundo dados pelas sondas Van Allen Probes A e B. Os dados dessas sondas permitiram a descoberta de um terceiro cinturão de radiação transiente entre os dois externos já esperados, mostrado nesta figura.



Áreas avermelhadas indicam maior densidade de elétrons.
Fonte: AERONAUTICS e NASA (2018).

Figura 1.2 - Medida do fluxo de elétrons relativísticos obtida pelas sondas Van Allen Probes A e B no período de 01/01/2017 até 27/12/2017.



Áreas avermelhadas indicam maior densidade de elétrons.

Fonte: AERONAUTICS e (nasa) (2018).

No estudo do cinturão de Van Allen é conveniente medir o fluxo de partículas em termos de sua energia, espécie e direção de propagação. Esses parâmetros são geralmente relevantes para estimar danos em satélites e para observação científica. De forma mais detalhada, sabe-se que essa região é povoada prioritariamente por elétrons e prótons nas faixas de energia de 100 keV - 10 MeV e 10 MeV - 50 MeV, respectivamente. A faixa de energia maior que 1 MeV é especialmente estudada por dois motivos principais: (i) fenômenos de aceleração de partículas são melhores identificados quando existe aumento de fluxo de elétrons nessa faixa (REEVES et al., 2003); (ii) elevada energia dos prótons são responsáveis por eventos de maior dano a dispositivos espaciais (Eventos de efeito único - *Single Event Effects-SEE*) (DUZELLIER, 2005).

Ampliar o monitoramento do clima espacial na região dos cinturões de radiação para o aprimoramento de modelos não é tarefa trivial. A extensão dessa região impõe a necessidade de vários instrumentos em órbita para esse fim. A grande parte dos dispositivos em órbita contemporâneos são resultados de empreendimentos de poucos países, a maioria desenvolvidos, dado o alto custo de uma missão espacial. Nesse sentido, é interessante que se procure cada vez mais alternativas tecnológicas para redução de custos. Assim, é possível expandir a acessibilidade ao espaço, para que outros países com orçamento reduzido considere tal investimento. Além disso, em países subdesenvolvidos esse tipo de atividade podem criar oportunidades para acelerar seu desenvolvimento.

Uma das alternativas atuais que alguns países com orçamento reduzido utilizam para realização de experimentos científicos no espaço é através de pequenos satélites, em especial os *CubeSats* (TOORIAN et al., 2008; WOELLERT et al., 2011; POGHOSYAN; GOLKAR, 2017). O uso dessas plataformas reduz significativamente os custos de uma missão espacial, devido a seu design compacto, leve e ao uso de componentes comerciais mais acessíveis. Existem diversas missões de clima espacial que utilizam pequenos satélites para aquisição de dados (VISCIO et al., 2014; ROBINSON; MORETTO, 2008), entretanto com tecnologias pouco acessíveis, o que cria um empecilho para desenvolvimento de projetos similares em países com pouca estrutura tecnológica.

1.1 Objetivos

Este projeto tem como objetivo apresentar o desenvolvimento de um detector de partículas energéticas para uso espacial, adequado a plataformas do tipo *Cube-sats*. A detecção de partículas é feita baseada na utilização de dispositivos ópticos

(cintilador associado a fotodetector) e sistema de amplificação de sinais analógico. Considerando que o sistema detector é proposto para operar em um ambiente com ampla diversidade de partículas energéticas, propôs-se uma solução para aprimorar o reconhecimento das partículas de interesse (elétrons e prótons) e, ao mesmo tempo, determinar a energia associada a essas partículas. Para avaliar o desempenho e a capacidade foi desenvolvido um modelo conceitual em ambiente de simulação

A idealização da topologia é baseada na revisão das tecnologias de alguns instrumentos que obtiveram destaque no estudo do fluxo de partículas no cinturão de Van Allen. O conceito apresenta uma nova forma de composição e organização, selecionadas por critérios de simplicidade, acessibilidade de seus componentes, e capacidade de compactação. São desenvolvidos modelos virtuais para demonstração preliminar de seu comportamento e características. O termo *topologia* tratado aqui, é usado para definir a maneira como partes de um sistema se conectam ou são organizadas. No presente caso, aplica-se essa expressão, para avaliar os elementos possíveis para compor um detector. Este trabalho visa contribuir na viabilidade de desenvolvimento de projetos de missões para monitoramento do cinturão em missões baixo custo. Os objetivos principais deste trabalho são:

- a) Revisão de instrumentos de detecção de radiação e suas topologias.
- b) Construção de topologia conceitual adequada a *Cubesats* através de modelos virtuais que permitam estimar alguns parâmetros de construção (geometria, massa, faixa de taxa de contagem, erro de estimativa de energia, eficiência de classificação).
- c) Construção de ambiente para simulação da resposta dos modelos criados, registro e apresentação dos parâmetros obtidos.
- d) Desenvolvimento de sistema digital de análise de dados, baseado em redes neurais, capaz de identificar as partículas de interesse, bem como a energia cinética

1.2 Metodologia

A conceito do detector foi desenvolvido para atender as seguintes necessidades: (i) identificar a energia de elétrons e prótons na faixa de 1 - 10 MeV e 1 MeV - 50 MeV respectivamente, com resolução mínima pretendida de no máximo 1 MeV; (ii) contar essas partículas até uma taxa de 10^5 partículas/s; (iii) admitir partículas limitadas

a um campo de visão de até 10° . Assim, buscou-se na literatura, descrever os princípios básicos de cada um dos principais subsistemas de detectores de radiação comuns a este contexto. Listou-se elementos sensores a base de silício e alguns cintiladores. Para formatação do sinal foram estudadas práticas analógicas, com uso de elementos eletrônicos, e alguns dos algoritmos digitais com funções similares. Para a análise do sinal, foram descritos alguns algoritmos de classificação baseado em reconhecimento de padrões. Todos os métodos apresentados neste estudo, em cada um dos subsistemas, serão analisados através de modelos virtuais e com resultados obtidos em exemplos de aplicações na literatura. Serão descritos os parâmetros fundamentais de funcionamento das soluções estudadas. A partir do modelo eletrônico, pode-se estimar a potência consumida e as especificações de alimentação (tensão e corrente).

Com esse compilado de análises, é proposto uma topologia conceitual de um detector de radiação adequado a aplicação em questão. As unidades elementares são modeladas quanto sua resposta conjunta a diferentes tipos de partículas de entrada, presentes no futuro ambiente de medição. Além disso, é desenvolvido um desenho virtual com a distribuição espacial dos componentes da topologia proposta, bem como a estrutura de colimação e proteção de radiação necessárias. Esses modelos permitem uma descrição preliminar dos parâmetros do sistema proposto, tais como a eficiência de suas medições (contagem de partículas, estimação de energia, e classificação de espécie), e quanto a parâmetros dimensionais disposição das unidades, escudo (material e espessura).

O presente trabalho é organizado como segue:

Capítulo 2 São apresentados, com mais detalhes, os desafios que este trabalho dispõe a contribuir em relação ao estudo dos cinturões. É discutido sobre os riscos do ambiente radiativo em dispositivos espaciais e um pequeno resumo é desenvolvido sobre as características de classificação de pequenos satélites bem como sobre a plataforma CubeSat. Desse modo, é demonstrado como o aumento do monitoramento da radiação nessa região pode refinar modelos do clima espacial e permitir o entendimento de novos fenômenos.

Capítulo 3-4 Nesses capítulos são descritos os conceitos essenciais que fundamentam a realização deste trabalho, nos temas: sistemas clássicos de detecção de radiação (Capítulo 3); clima espacial e a dinâmica do cinturão de Van Allen (Capítulo 4);

Capítulo 5 São apresentados um resumo sobre algumas missões anteriores, com ob-

jetivos de estudo do cinturão de Van Allen, que obtiveram destaque por seus resultados. São colocados em destaques duas soluções tecnológicas de detectores já usados em CubeSats: REPTile e Aalto1. O instrumento detector de cada uma das missões são analisados conforme seus principais elementos tecnológicos funcionais agrupados nas seguintes unidades básicas: (i) unidade sensora; (ii) unidade de formatação do sinal; (iii) unidade de análise do sinal; e (iv) unidade de colimação e proteção de radiação. São descritas suas principais características de operação e composição. Esses elementos são também analisados quanto a viabilidade em uma aplicação em pequenos satélites, dado em critérios de massa, volume e recursos de operação necessários (e.g. tensão de alimentação, colimação, proteção de radiação, entre outros).

Capítulo 6 Com as diversas soluções tecnológicas estudadas no capítulo anterior é proposto uma topologia conceitual para um detector de radiação adequado a aplicação em questão. As unidades elementares (ii) a (iv) são modeladas quanto sua resposta conjunta a diferentes tipos de partículas de entrada, presentes no futuro ambiente de medição. É desenvolvido um desenho virtual com a distribuição espacial dos componentes da topologia proposta, bem como a estrutura de colimação e proteção de radiação necessárias (unidade (iv)). Esses modelos permitem uma descrição preliminar dos parâmetros do sistema proposto, tais como a eficiência de suas medições (contagem de partículas, estimação de energia, e classificação de espécie) e quanto a parâmetros de massa, dimensões, disposição das unidades.

Capítulo 7 Apresentação do ambiente de simulação e suas características. É mostrado como é feita a parametrização das entrada de uma simulação e a respectiva coleta dos resultados. O resultado das análises de diversos tipos de simulação é também exibido.

Capítulo 8 Discussão dos resultados, e sugestões de trabalhos futuros.

2 MOTIVAÇÃO

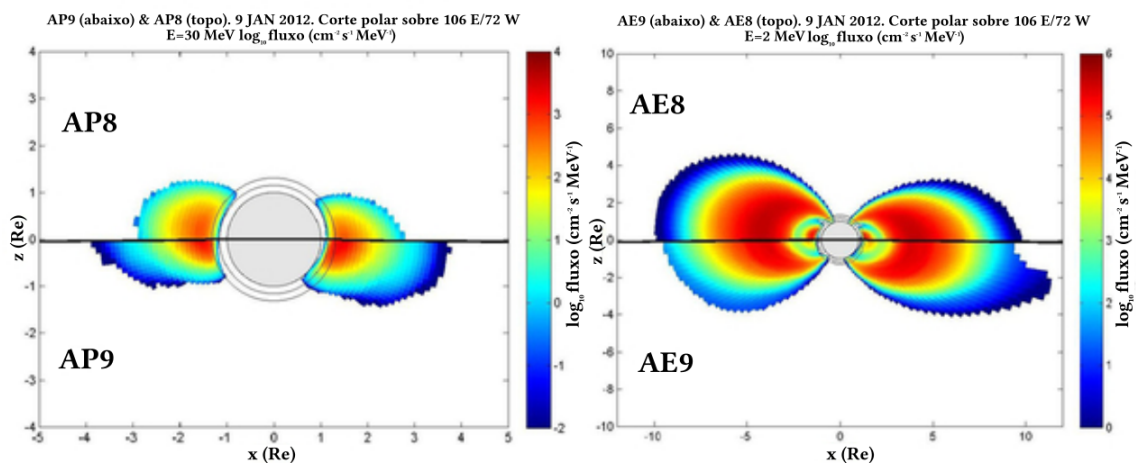
O contínuo monitoramento do fluxo de partículas dos cinturões de radiações pode proporcionar um melhor entendimento da dinâmica de alguns fenômenos ainda não completamente explicados, tais como o equilíbrio entre os mecanismos de perda e aceleração de partículas carregadas nesse meio. Atualmente, tem-se diversas missões espaciais 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.

A engenharia espacial é uma área com grande interesse no estudo de radiação dos cinturões. Sabe-se que a radiação espacial tem sido uma expressiva causa de falhas em dispositivos espaciais a bordo de satélite (HANDS et al., 2018). Uma missão espacial é um empreendimento de alto custo, e falhas devem ser minimizadas para aumento de sua confiabilidade. Desse modo, ao conhecer o ambiente em que o dispositivo espacial será inserido é possível projetar as devidas ações mitigadoras para redução de riscos. Com dados de vários instrumentos em órbita (BARTH et al., 2003), no que diz respeito a radiação espacial, é possível desenvolver modelos com estimativas do fluxo de partículas ionizantes em diversas posições. Contudo, a resolução temporal e espacial de tais modelos é pequena, e nem sempre correspondem a realidade. Por exemplo, eventos estocásticos de liberação de alta energia no Sol podem ser percussores de variações nessas estimativas, seja de modo direto, e.g. no espaço profundo, ou indireto e.g. na interação com a magnetosfera terrestre. Desse modo, é necessário aumentar o número de instrumentos de coleta de dados de radiação espacial para refinar tais modelos. Para ilustração considere os modelos AE9 e AP9, Figura 2.1 que fornece uma estimativa do fluxo de elétrons e prótons, respectivamente, em torno da Terra. Esse modelo conta com uma base de dados de mais 37 satélites desde 1976 ate 2011, cobrindo três ciclos solares. O modelo anterior, AE8 e AP8, contava com uma base de 24 satélites (PICH, M. S. S. et al., 2017). A Figura 2.1 mostra, a título de comparação, o refinamento atingido pela atualização do mesmo.

O Brasil, apesar de grandes esforços no estudo do clima espacial, ainda não detém um instrumento próprio de monitoramento do cinturão de radiação. Os pesquisadores

da área recorrem a dados estrangeiros, alheio a suas diretrizes e disponibilidade. Para aumentar a autonomia brasileira nas pesquisas do clima espacial é necessário portanto um instrumento de monitoramento nacional. Além disso, um instrumento com essa finalidade contribui para outras missões espaciais, tanto na engenharia de proteção contra radiação quanto no alertas de eventos do clima espacial.

Figura 2.1 - Comparação entre AP8 e AP9.



(a) Comparação entre AP8 (topo) e AP9 V1.05 (baixo) em um corte meridional através dos cinturões de radiação, com fluxo de prótons de 30 MeV. (b) O mesmo formato, mas para AE8(topo) e AE9 1.05 (baixo), fluxo de elétrons de 2 MeV. A unidade de medidas expressa nos eixos x e y são raios terrestres (Re). Áreas avermelhadas indicam maior intensidade de fluxo.

Fonte: Johnston et al. (2014).

2.1 Risco do Ambiente Radiativo em Dispositivos Espaciais

A radiação presente no ambiente espacial pode induzir diversos efeitos em satélites que conduzem a eventuais falhas ou degradação operacional. Até mesmo um pequeno mas contínuo fluxo de partículas, podem transferir sua carga para superfícies do satélite que conduzem a grandes descargas de energia elétrica com potencial para danificar células solares, tanques de propulsão, e muitos outros componentes eletrônicos. Contudo o maior risco é referente a partículas de alta energia, acima de 1 MeV. Nessa escala, a radiação consegue penetrar no interior do dispositivo espacial, alcançando com facilidade diversos materiais com propriedades muito sensíveis a radiação. Segundo Stratton et al. (2013) carregamento interno e descargas dielétricas

cas são ambas causadas por elétrons e íons de alta energia penetrando na estrutura de observação e no resto do satélite. Essas partículas fazem com que superfícies internas sejam carregadas eletricamente até que se ultrapasse o limite de tensão de isolamento (*breakdown*), momento em que se descarregam no terra local (regiões no satélite a qual a referência de tensão é zero). Essa descarga pode resultar em danos de circuitos eletrônicos, ou mudanças de estados digitais (*upsets*) ou ruídos nos subsistemas do satélite e instrumentos.

Partículas com grande energia podem danificar a estrutura cristalina de vários materiais o que altera suas propriedades, como é observado no embaçamento de lentes de telescópios. Pode-se dizer que os materiais semicondutores são os elementos mais sensíveis do satélite, no sentido de falhas por interação com radiação de alta energia. Pequenos desvios de suas propriedades elétricas podem alterar um bit na memória, o nível de corrente consumida, entre outros. Dependendo da localização que esses erros aparecem, falhas críticas podem ocorrer. A mudança de bit por exemplo, chamada de *bit flip*, pode corromper algum registrador crucial para o sistema de atitude e comprometer todo o controle de orientação. Outro exemplo, é o aumento súbito do consumo de corrente de um determinado circuito, devido a mudança de propriedade de condutância de um de seus transistor, que pode alcançar valores tão altos até sua destruição. A principal e primordial estratégia para conduzir as ações de mitigação das falhas em dispositivos espaciais devido a interação de radiação com seus componentes eletrônicos é o entendimento, previsão e caracterização do ambiente radioativo em que o mesmo estará inserido. Com essa análise é possível por exemplo, propor uma proteção (escudo) adequada, qualificar componentes, avaliar órbitas alternativas, planejar modos de operação tolerantes a eventos extremos, entre outras ações mitigadoras. Schiller et al. (2014) afirma que a falta de capacidade preditiva é causada pela imaturidade em entender as dinâmicas na magnetosfera terrestre, e além disso, a heliosfera Solar. Ele reforça que o clima espacial, o qual pode ser tão perigoso quanto sua contraparte terrestre, é de longe pouco entendido. Com isso, ele também conclui que a atual dependência da sociedade em tecnologias espaciais motiva investimentos em mitigação de riscos para ativos relacionados ao espaço, e que grande parte destes esforços são direcionadas para ao entendimento de quais processos físicos são responsáveis pelas adversidades dos efeitos de clima espacial.

A radiação espacial pode induzir diversos efeitos em dispositivos eletrônicos espaciais. Partículas ionizantes de alta energia ao atingir materiais, promovem um volume de ionização em sua trajetória e depositam certa quantidade de carga no mesmo. A taxa de transferência dessa energia depende de alguns parâmetros, entre eles sua

energia, espécie, e o tipo de material que interage. Para descrever esse comportamento é conveniente o uso da unidade de taxa de transferência de energia (do inglês *Linear Energy Transfer* - LET). Essa grandeza expressa a quantidade de energia depositada pela partícula no material por unidade de distância de seu caminho e massa do material (DUZELLIER, 2005). Quando o caminho de ionização atinge a junção de dispositivos semicondutores, definida com sua região sensível, e altera seu funcionamento tem-se um evento de efeito único (do inglês *Single Event Effect* -SEE). As cargas geradas pela partícula incidente em uma região sensível subitamente altera o formato da zona de depleção e de forma mais lenta se difunde para o substrato. O nível de carga necessário para alterar a funcionalidade de um dispositivo e caracterizar um SEE, é chamada de carga crítica (DUZELLIER, 2005).

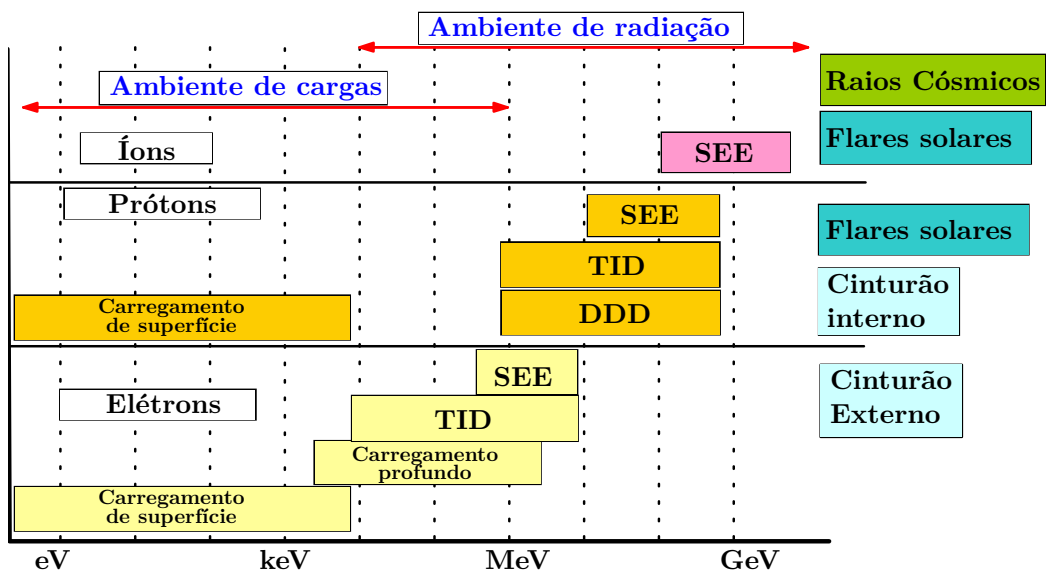
Mesmo que uma partícula que atinja um dispositivo não tenha energia suficiente para desencadear um SEE pode contribuir para o acúmulo de cargas, que também induz efeitos indesejáveis em dispositivos eletrônicos. Além disso, as colisões da partícula no meio material podem deslocar átomos de sua matriz. Esse efeito é chamado de dano por deslocamento (do inglês, *Displacement Damage* - DDD) e quando ocorre em dispositivos semicondutores, pode criar armadilhas onde cargas são coletadas. A dose ionizante total (do inglês, *Total Ionising Dose*) são os efeitos causados pelo acúmulo de cargas no dispositivo semicondutor que altera suas propriedades de funcionamento (DUZELLIER, 2005), e.g. aumenta de forma incontrolável o consumo de corrente, altera ganho de transistores, entre muitos outros.

Atualmente as agências líderes no setor espacial dispõe de ferramentas para o estudo de falhas relacionadas a radiação em satélites com uma grande base de dados com a experiência de suas missões anteriores. A agência europeia fornece para uso público, contudo sem acesso a sua base de dados, a plataforma SPENVIS que permite a análise de diversos modelos referentes ao ambiente espacial e sua interação com instrumentos espaciais. Em espacial dentro dessa plataforma tem-se os modelos AE8 e AE9, para a estimativa do fluxo de elétrons e prótons no espaço próximo da Terra.

O ambiente de radiação ionizante próximo a Terra consiste em componentes vindas de raios cósmicos (do inglês *Galactic Cosmic Rays*-GCRs), de partículas energéticas solares (do inglês *solar energetic particles* - SEPs) e pelas partículas do cinturão de radiação. (VAINIO et al., 2009). A Figura 2.2 apresentada por (ECOFFET, 2013), mostra a contribuição de efeitos de radiação em satélites por cada uma dessas componentes. As partículas armazenadas no cinturão contribui para os três efeitos expressos em componentes eletrônicos, i.e. SEE, TID e DDD. De fato esses efeitos

são as principais causas de falhas em dispositivos espaciais. Vainio et al. (2009) evidencia a relação da dinâmica de radiação do cinturão com a presença de anomalias em dois satélites em órbita baixa (LEO).

Figura 2.2 - Características da radiação espacial de diferentes fontes, e seus efeitos em satélites.



Fonte: Adaptado de Ecoffet (2013).

As regiões do cinturão de radiação são dinâmicas e alteram suas características conforme eventos do clima espacial. Iucci et al. (2005) mostra, através de extensa base de dados, que existe grande aumento de anomalias em eventos extremos do clima espacial. A Tabela 2.1 sumariza as observações do autor.

Tabela 2.1 - Tabela evidenciando a relação entre a alta taxa de fluxo de elétrons e prótons e a ocorrência de anomalias em satélites.

Parâmetro	Dias calmos (Sem Anomalias)	Dias provavelmente perigosos (Anomalias em um ou dois satélites)	Dias perigosos (Anomalias em mais que três satélites)
Número de dias total	5862	2606	298
Número de anomalias por dia por satélite	0	1.6	4.55
Numero de satélites com anomalias por dia	0	1.24	3.51
Máximo fluxo de prótons (>10 MeV)	8.2	18.1	91
Fluência de elétrons (>2MeV)[x10 ⁷]	4.9	7.6	12.7

Fonte: Adaptado de Lucci et al. (2005).

Dado a expressiva taxa de falhas de dispositivos espaciais devido a efeitos da radiação em seus componentes, é extremamente necessário incorporar modelos da dinâmica desse ambiente radioativo em que se inserem para análise de riscos. "Falhas induzidas por radiação e modos degradados dependem criticamente tanto da aplicação quanto da tecnologia do componente, portanto é essencial que engenheiros de radiação, de componente, de projeto e de sistemas trabalhem juntos, preferencialmente nas fases iniciais do programa, para garantir que aplicações críticas sejam atendidas em tempo para maximizar a probabilidade do sucesso da missão"(DIBARI, 2013). Um dos primeiros passos para essa análise é a estimativa do ambiente radioativo em que a missão projetada irá operar. Geralmente o ambiente é descrito quanto ao fluxo radioativo, em níveis de energia, espécie (tipo da radiação) e direção. Usa-se modelos do clima espacial construídos com dados obtidos em instrumentos em diferentes órbitas. Dado a vastidão do ambiente espacial e a variação temporal das aquisições, é necessário a combinação de modelos teóricos nesta base de dados para completar áreas não monitoradas e considerar a dinâmica temporal.

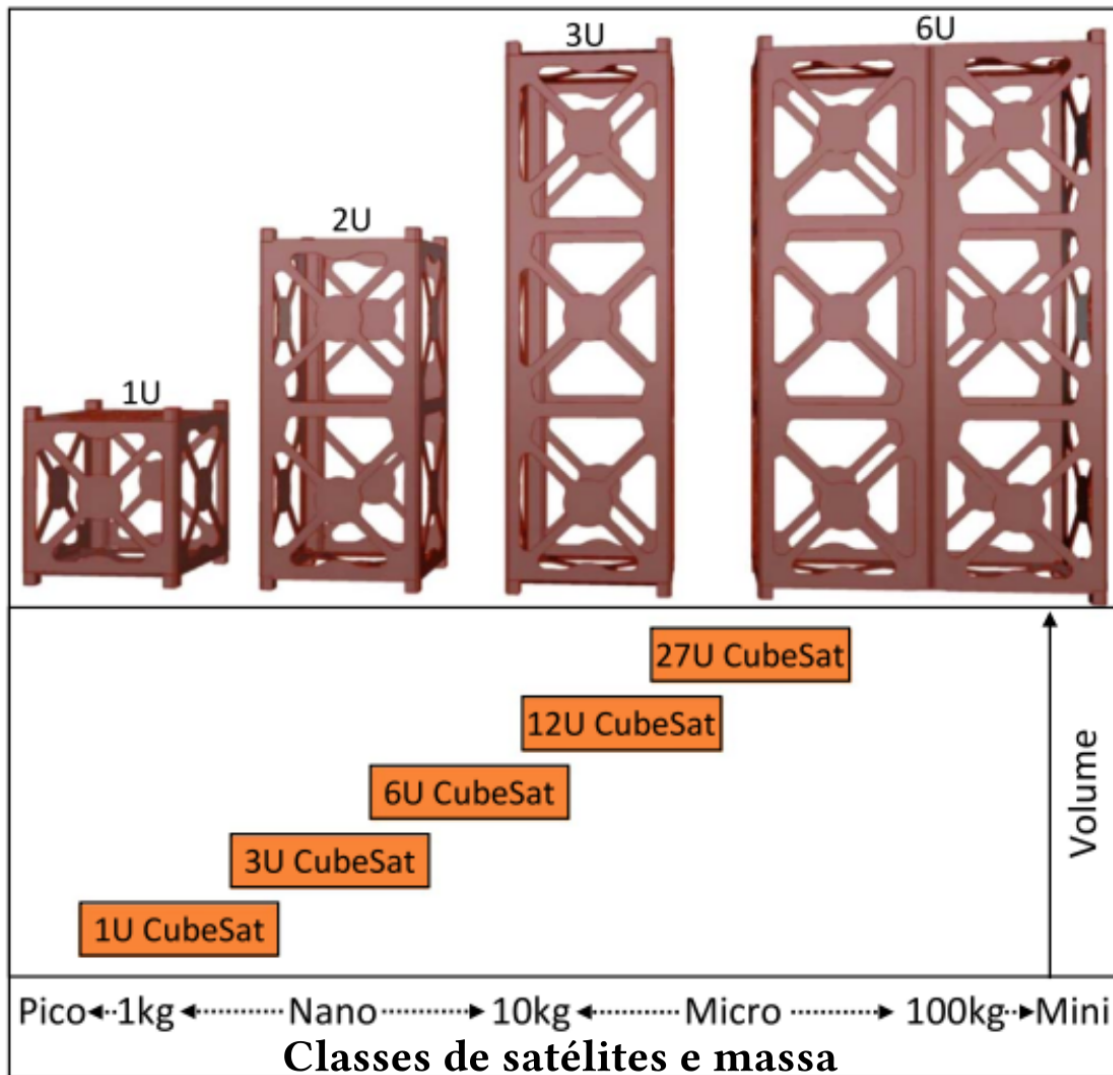
A Agência Espacial Europeia (ESA - *Europe Space Agency*) fornece um conjunto de ferramentas para estimativa do ambiente de um dispositivo espacial hipotético parametrizado pelo usuário em termos de órbita, formato, entre outros. É possível por exemplo identificar a dose total de radiação absorvida pelo dispositivo, assim como o fluxo de partículas enérgicas. Em espacial dentro deste conjunto de ferramentas, é fornecido o modelo criado pela NASA de caracterização dos cinturões de radiação. Este modelo permite estimar o fluxo de elétrons (modelo AE9) e prótons (AP9) em diferentes posições no espaço próximo a Terra parametrizado pelo parâmetro L (unidade que demarca camadas da magnetosfera onde espera-se certa coerência das

partículas armazenadas, mais detalhes ver [Capítulo 4 Seção 4.7](#)).

2.2 Satélites Miniaturizados para Monitoramento do Clima Espacial

Classificam-se como satélites miniaturizados, os dispositivos espaciais com dimensões e massa muito reduzidas em relação aos satélites convencionais. Existem muitas classes desses dispositivos, geralmente determinada quanto sua massa. Entre os exemplos mais comuns de satélites miniaturizados tem-se os CubeSats, plataforma para dispositivos espaciais com módulos em formato de cubo. Neste trabalho definiu-se a classificação dado pela [Figura 2.3](#) que mostra a denominação de cada grupo.

Figura 2.3 - Classificação de satélites miniaturizados quanto a massa, e diferentes montagens com a plataforma CubeSat. O CubeSat de 1U é considerado um nanosatélite.



Fonte: Adaptado de Poghosyan e Golkar (2017).

O conceito de CubeSat iniciou-se nas universidades de Stanford e Universidade Politécnica do Estado da Califórnia em meados de 1999 para atender a necessidade educacional de se ter um satélite capaz de ser desenvolvido com um a dois anos, de baixo custo e pequena massa (PUIG-SUARI et al., 2001). Contudo, suas potencialidades operacionais o tornaram de fato condutor de várias missões no espaço, com expressivo destaque em missões científicas (POGHOSYAN; GOLKAR, 2017). Os Cube-

Sats possuem formato de cubo com 10 cm de aresta com massa não superior a 1 Kg (PUIG-SUARI et al., 2001). O tamanho da plataforma consegue embarcar, com a eletrônica atual, os principais sistemas digitais necessários para a atividade espacial i.e. controle de atitude, condicionamento de energia, computador de bordo entre outros. Sendo usados para missões de curto prazo, em torno de 2 a 3 anos, é possível a utilização de componentes comerciais. Essas características tornou popular a plataforma CubeSat em inúmeras aplicações(POGHOSYAN; GOLKAR, 2017).

Missões com satélites minimizados podem complementar missões espaciais existentes ou planejadas, cobrindo eventuais lacunas espaciais e temporais, ou até mesmo conduzindo missões autônomas focadas a questões científicas bem definidas(ROBINSON; MORETTO, 2008). Existem diversos exemplos da aplicação de CubeSats para a pesquisa científica relacionada ao clima espacial. Poghosyan e Golkar (2017) lista algumas, e afirma a possibilidade de missões de alta performance a serem desenvolvidas que vão avançar ainda mais o estado de predição assim como reforçar as funcionalidades das plataformas CubeSat como sistemas capazes, inclusive, de compor futuras redes de estações de clima espacial.

Outro ponto positivo da abordagem de CubeSat para desenvolvimento de missões, é permitir maior acessibilidade ao espaço (TOORIAN et al., 2008). Atualmente os seus idealizadores (*Cal Poly e Stanford*) fornecem uma série de padrões e especificações para auxiliar o projeto de novas missões com uso dessa plataforma. O padrão denominado *CubeSat Design Specification*, (CUBESAT, 2015), apresenta boas práticas de desenvolvimento e indica vários requisitos básicos necessários, entre eles os relacionados a compatibilidade com o equipamento de inserção de órbita (*The Poly-Picosatellite Orbital Deployer*). Essas ferramentas são fornecidas de forma gratuita como domínio público. Essas vantagens reduzem ainda mais o custo de desenvolvimento desse tipo de dispositivo, o que torna o espaço mais acessível a nações com menor orçamento. Assim como é colocado por (WOELLERT et al., 2011), o avanço tecnológico do CubeSat pode contribuir com a expansão de capital intelectual de nações em desenvolvimento, parte necessários para sua prosperidade econômica de longo prazo.

Nesse sentido o presente trabalho busca contribuir com ao melhor entendimento do clima espacial, por meio da proposta conceitual de um detector de partículas energéticas presentes nas regiões dos cinturões de radiação, de baixo custo, que seja adequado a plataformas CubeSats. Através da revisita aos principais instrumentos usados para o estudo dos cinturões de Van Allen, propõe-se a topologia

de detecção. As unidades essenciais da topologia são modelados virtualmente e alguns parâmetros, operacionais e construtivos, são obtidos por simulações. De forma geral o conceito proposto é dividido em quatro unidades: (i) unidade sensora; (ii) unidade de formatação; (iii) unidade de análise; (iv) unidade de colimação e proteção. As unidades (i) a (iii) são avaliadas por análise de sua resposta funcional ao ambiente de radiação alvo, definido com a simulação da incidência de partículas de diferentes espécies, energia e tempo de chegada, com auxílio do software MATLAB/SIMULINK. A unidade (iv) é estudada por meio de softwares de modelagem gráfica onde é possível analisar dimensionalmente o volume total e disposição dos componentes das unidades anteriores, e por programas para especificação do escudo de proteção contra radiação.

3 DETECTORES DE RADIAÇÃO

Um sistema de detecção pode ser construído com diversas soluções diferentes. Contudo existem conceitos e subsistemas mais comuns, com funções essenciais. A unidade sensora, tratada aqui, é o subsistema responsável pela conversão da energia depositada, devido a interação da radiação com a matéria, em um sinal elétrico. A unidade de formatação é responsável por adequar esse sinal para leitura e aquisição. E por fim um subsistema de análise que interpreta as informações obtidas e gera a resposta da medição, geralmente em espectro de energia. Adicionalmente é necessário conhecer algumas características operacionais do detector para apresentação coerente dessa sua resposta. Com o espectro resultante e conhecendo a geometria que define o campo de visão do detector é possível estimar o fluxo de radiação ao qual o instrumento está inserido. Outro parâmetro operacional importante é o chamado "tempo morto": o intervalo que o detector processa um evento e não consegue processar outro paralelamente. Esse parâmetro limita na taxa de eventos máximo que o instrumento admite.

Quando uma partícula nuclear atravessa a matéria, dissipa energia causando ionização e excitação das moléculas do material. Esse fenômeno serve de base para compor a maioria dos instrumentos de detecção (BIRKS, 1964). Existe vários tipos de materiais que podem compõem um detector, entre os mais comuns tem-se com uso de semicondutores ou cintiladores. De forma simplificada, pode-se dizer que uma carga Q é depositada no material pela incidência de uma simples partícula ou um quantum de radiação. Para cada tipo de material usado na detecção existe um método de coleta dessa carga. Em semicondutores é com a imposição de um campo elétrico, onde os portadores de carga são acelerados em sentidos opostos gerando um pulso de corrente. Em cintiladores entretanto tem-se duas etapas de detecção. A carga gerada pela interação da partícula produz radiação eletromagnética (fótons) e que por sua vez é coletada por outro detector. Ao se usar semicondutores para coleta desses fótons o processo de geração do pulso de corrente é semelhante ao anterior. Chama-se tempo de coleta (t_c) o intervalo necessário para coletar toda carga depositada no detector (KNOLL, 2010).

A corrente de saída do detector transporta muitas informações da interação da radiação incidente. Por exemplo, ao se integrar o pulso de corrente no tempo é possível estimar a carga total depositada Equação 3. Esta carga é diretamente relacionada com energia total da radiação incidente. Portanto, essa prática é muito comum em aplicações de espectrometria de radiação. Além da energia, em muitas aplicações é

necessário contar os pulsos que alcançaram um determinado valor limite de intensidade, ou seja, contar os eventos de incidência de radiação no detector com energia acima de um certo nível. Essa abordagem é realizada com a contagem de pulso. Outra informação importante esta relacionada ao formato do pulso, ou seja, em termos de sua intensidade pelo tempo. Com essa Análise de Formato de Pulso (*Pulse Shape Analysis*) é possível, entre muitos: conhecer o momento exato da incidência da radiação; estudar comportamento de deposição de energia ao longo no tempo no material e estimar o tipo de radiação envolvida; estimar o tempo entre eventos sem que haja sobreposição (KNOLL, 2010).

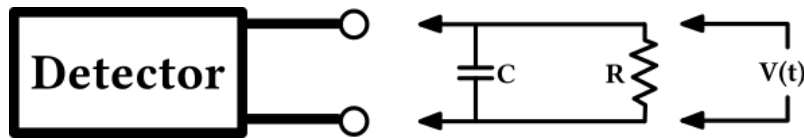
$$\int_0^{t_c} i(t)dt = Q. \quad (3.1)$$

Para formatar o pulso de corrente gerado pelo evento único são usados circuitos elétricos que facilitam a aquisição de suas informações. A natureza e a forma do pulso se alteram com relação as características da entrada dos circuitos de leitura. Deve-se portanto conhecer esses efeitos para correta estimativa das informações do pulso original. Na maioria das aplicações o pulso de tensão resultante $V(t)$ é o objeto de estudo da interação do detector com a radiação incidente. Talvez pela facilidade de operação com sinais em tensão, visto a vasta opções de eletrônicos que operam com tensão e não corrente. Dessa forma, para ilustrar a essência do subsistema de formatação considere um circuito construído com a associação de um capacitor C e uma resistor R Figura 3.1 conectado na saída da unidade sensora. O formato do pulso de tensão resultante depende da constante de tempo definida por $\tau = RC$. Quando τ é muito menor que o tempo de coleta t_c do detector tem-se um formato idêntico do pulso de corrente. Em contraste extremo, quanto τ for muito maior que t_c a tensão fica contida por maior tempo no capacitor. A Figura 3.2 detalha estes dois comportamentos(KNOLL, 2010). A grande vantagem dessa abordagem é que esse circuito aplica no sinal de corrente uma operação matemática similar a integração. Desse modo é possível calcular a carga total depositada pelo evento com a leitura do pico de tensão, método conhecido por Análise de PHA (*Pulse Height Analysis*).

Existem diversas metodologias analógicas, com associações de componentes eletrônicos, e digitais, com algoritmos em software para compor a unidade de formatação. Com técnicas analógicas, por exemplo tem-se circuitos sensíveis a passagem por zero de um pulso bipolarizado (BUCKENS; VEATCH, 1992), conversores tempo-amplitude (ALEXANDER; GOULDING, 1961) entre outros. Em aplicações de espectrometria clás-

sica, é comum a 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 com a digitalização da saída do amplificador de carga e identificação dos picos por rotinas virtuais. Na metodologia digital é comum o uso de algoritmos com funções matemáticas similares aos elementos analógicos, contudo sem a necessidade de componentes físicos como, por exemplo, o trabalho de (GRZYWACZ, 2003). Em (SOSA et al., 2016) tem-se a comparação das duas abordagens para a discriminação do pulso, e conclui-se que a prática digital é mais recomendada, destacando: "A performance digital do PSA é melhorada quando o formato do pulso é mais precisamente resolvido. Mantendo o ganho do detector e aumentando a taxa de amostragem, espera-se que o PSA digital possa ser ainda mais melhorado (SOSA et al., 2016)". De modo geral, as práticas digitais são mais compactas que as analógicas, dado que muitas funções dos componentes eletrônicos podem ser desempenhadas virtualmente (KNOLL, 2010).

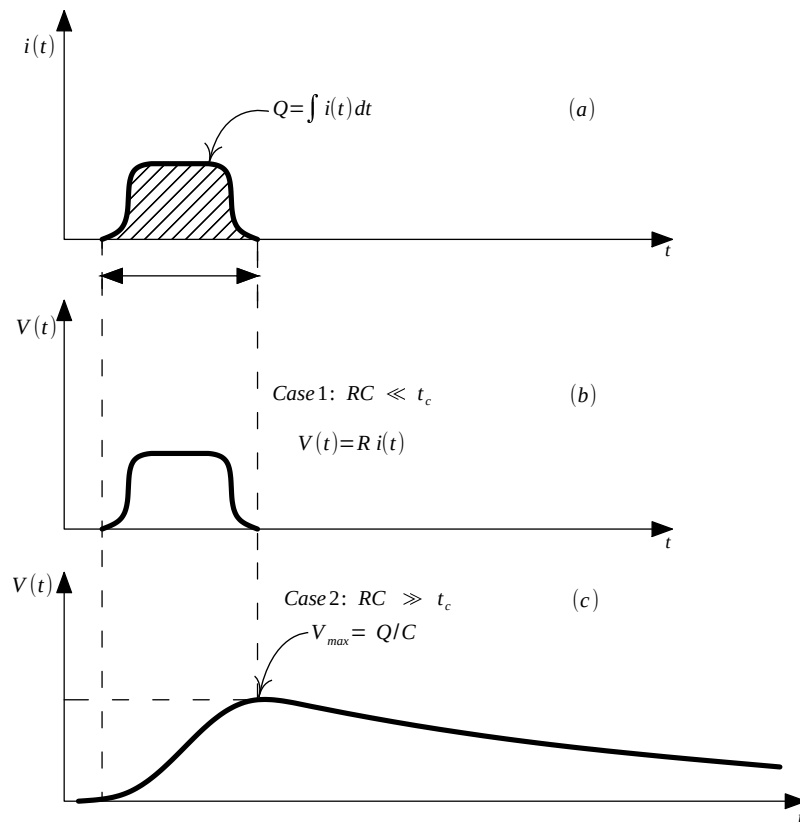
Figura 3.1 - Detector em modo de pulso. Circuito de leitura simplificado por uma capacitância e resistência



R e C representam a resistência e capacitância do sistema de leitura, respectivamente

Fonte: Knoll (2010)

Figura 3.2 - Relação entre carga depositada no sensor e relativa resposta em tensão de elemento de leitura RC.



(a) Carga total depositada no elemento sensor; (b) Formatação do pulso de corrente, de um único evento, por um circuito com constante de tempo pequena. (c) constante de tempo ligeiramente maior que o tempo de coleta, a carga total depositada no elemento sensor, neste caso, é proporcional ao pico de tensão do pulso.

Fonte: Adaptado de Knoll (2010).

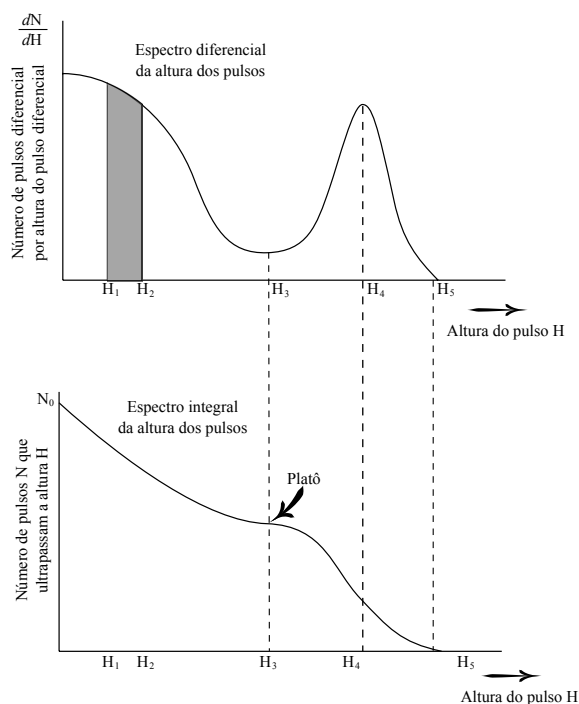
Com as informações do pulso discriminadas é preciso processá-las para corresponder a grandezas físicas quantificáveis. Com o valor do pico pode-se estimar a energia da radiação com uma simples função de proporcionalidade. Na contagem, soma-se o número de ocorrência desses picos. Alguns sensores tem a característica de produzir diferentes formatos de pulsos de acordo com o tipo da radiação que está a atingi-lo. A análise e classificação da espécie de radiação incidente é normalmente realizada por metodologias de análise de formato de pulso. No caso de cintiladores de iodeto de Césio, com a estimação do decaimento do pulso de corrente, pode-se traçar domínios de classificação referentes ao evento. Essa última metodologia tem sido facilitada com os avanços de algoritmos digitais de reconhecimento de padrões,

como por exemplo, redes neurais. No caso de detectores a base de silício é comum usar pilhas de detectores alinhados e através da análise do perfil de deposição de energia em cada camada estimar a espécie da radiação incidente.

3.1 Espectro de Altura de Pulso

O modo de operação de pulso permite adquirir informações de cada interação individual da radiação que depositou carga no detector. Altura do pico pode indicar a energia da mesma. Como já foi dito, esse tipo de análise se configura como espectrometria de radiação. Nesse tipo de aplicação é necessário ter conhecimento da quantidade de pulsos que ultrapassem um certo valor limite. Isso traduz a contagem da radiação que incide no detector acima de uma energia específica. Para tal estudo é comum o uso de uma representação gráfica do espectro de altura de pulso. O gráfico se assemelha a um histograma, onde cada valor de pico de pulso é uma classe, também chamada de canal, e a quantidade de ocorrência a frequência. Para identificar com mais clareza os detalhes do espectro, a contagem é descrita diferencialmente. Além do limite superior em que o pulso é classificado, tem-se um limite inferior. Desse modo a contagem é feita com os pulsos que estiverem entre esses dois limite, e a distribuição é dita diferencial. Dessa forma, uma dada contagem dN é relativa a um incremento de dH do limiar estabelecido. A [Figura 3.3](#) mostra esses exemplos de espectro de altura de pulso(KNOLL, 2010).

Figura 3.3 - Diferentes formas de apresentar graficamente o espectro de altura de pulsos.



(a) espectro derivativo; e (b) integrativo. Em destaque uma região onde a altura de pulso tem poucas contagens. No espectro derivativo esse detalhe é facilmente visualizado como uma região de vale, enquanto no integrativo a mesma faixa se apresenta como um "Platô".

Fonte: Adaptado de Knoll (2010).

3.2 Eficiência

A eficiência de contagem de um detector é geralmente descrita em duas classes: eficiência absoluta e intrínseca. A primeira, dada pela Equação 3.2, é referente a quantidade de pulsos observados sobre a quantidade de radiação emitida pela fonte. Essa depende tanto das propriedades do detector quanto da geometria do conjunto fonte-detector, como por exemplo, o ângulo sólido formado. Já a intrínseca, Equação 3.3, refere-se ao total de pulsos sobre a radiação que atinge o detector (KNOLL, 2010).

$$\epsilon_{abs} = \frac{\text{número de pulsos registrados}}{\text{número de quanta de radiação emitido pela fonte}} \quad (3.2)$$

$$\epsilon_{int} = \frac{\text{número de pulsos registrados}}{\text{número de quanta de radiação atingido o detector}} \quad (3.3)$$

As duas eficiências são correlacionadas para uma fonte isotrópica pela [Equação 3.4](#), onde ω é o ângulo sólido do detector visto pela fonte. Além disso, pode-se categorizar essas classes com relação a natureza do evento registrado. Se todos os pulsos gerados pelo detector são aceitos usa-se a eficiência total. Nesse caso todas as interações, não importando quão baixa energia for, assume-se que serão contadas. De forma prática, essa situação é dificilmente atingida, dado que possíveis ruídos eletrônicos podem ser confundidos com pulsos em limites de discriminação muito baixos. Assim usa-se a eficiência de pico, onde somente as radiações quantizadas que depositam toda sua energia no detector são contadas ([KNOLL, 2010](#)).

$$\epsilon_{abs} = \epsilon_{int} \cdot \left(\frac{4\pi}{\Omega} \right) \quad (3.4)$$

Um detector com eficiência conhecida pode ser usado para medir a atividade radiativa absoluta de uma determinada fonte. Esse cálculo é realizado ao considerar a eficiência intrínseca de pico ϵ_{ip} de um detector usado para registrar N eventos de total deposição de energia no espectro do mesmo. Ao considerar uma fonte de radiação isotrópica, sem nenhuma atenuação entre ela e o detector, o número de radiação quantizada emitido pela fonte S é dado por:

$$S = N \cdot \frac{4\pi}{\epsilon_{ip}\Omega} \quad (3.5)$$

onde Ω representa o ângulo sólido (em estereorradiano) definido pela integral da superfície do detector apontada para a fonte, [Equação 3.6](#)([KNOLL, 2010](#)).

$$\Omega = \int_A \frac{\cos \alpha}{r^2} dA \quad (3.6)$$

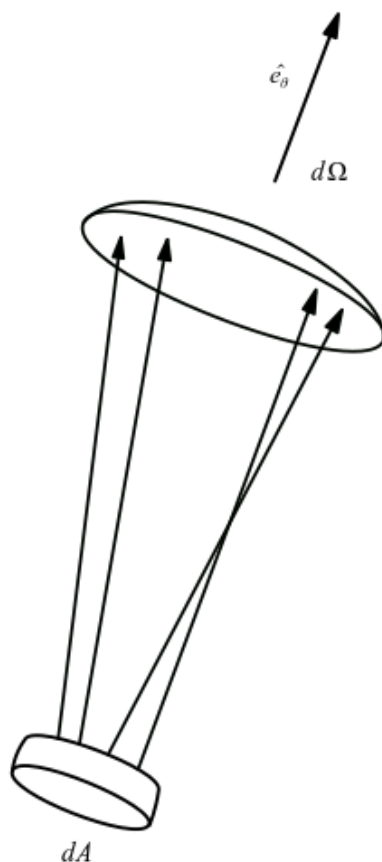
Sendo que r representa a distância entre a fonte e o elemento de superfície dA , e α o ângulo de sua normal em direção da fonte. Se a fonte de radiação possui um

volume não dispersível então deve-se adicionar outra integração para cada elemento de volume da mesma. Em algumas geometrias não existe solução analítica para a integral, sendo necessário sua resolução por métodos numéricos, como em Zhao et al. (2013), Hamzawy (2010), Carrillo (), Reifsnyder (1967).

3.3 Fluxo de Partículas

A resposta geralmente esperada de um detector é o número de contagem de partículas, dada sua energia e espécie. Contudo, para o estudo do cinturão de radiação, é necessário uma caracterização mais profunda da população de partículas como sua distribuição espacial, de energia e de ângulo de arremesso, cujo termo em inglês é "*pitch angle*". Para tanto, usa-se a unidade de fluxo de partículas que é definida como sendo o fluxo diferencial, calculado para uma certa direção e energia E (dado uma unidade dE), que atravessa uma unidade de área (perpendicular a direção considerada), e que esta compreendido por volume sólido (unidade de angulo sólido) em um intervalo de tempo de 1 segundo. A figura Figura 3.4 ilustra essa definição (WALT, 1994).

Figura 3.4 - Ilustração do conceito de fluxo de partículas.



Fluxo de partículas na direção \hat{e}_θ .

Fonte: Adaptado de Walt (1994).

Se dA é o elemento de área, $d\Omega$ é o elemento do ângulo sólido na direção \hat{e}_θ , e dE é o intervalo de energia em E em consideração, o número de partículas com energia entre E e $E + dE$ que atravessa dA na direção \hat{e}_θ em 1 segundo é dado por:

$$dN = j(E, \theta) dA dE d\Omega \quad (3.7)$$

Sendo que $j(E, \theta)$ é o fluxo diferencial, direcional de partículas (comumente em unidades $cm^{-2}s^{-1}str^{-1}MeV^{-1}$). De modo geral, no estudo da distribuição de partículas no cinturão de Van Allen a direção de referência é o vetor de campo geomagnético. Assim, a direção de fluxo é dado pelo *pitch angle* da partícula (WALT, 1994).

3.4 Tempo Morto

Em praticamente todos sistemas detectores de radiação, haverá valor mínimo de tempo que separa dois eventos para que sejam registrados como dois pulsos distintos. Em alguns casos esse tempo pode ser limitado por processos no próprio detector, e em outros o limite pode surgir com a eletrônica associada. O tempo mínimo de separação é usualmente chamado de "tempo morto" (*dead time*) do sistema de contagem. Por consequência da natureza randômica do decaimento radioativo, existe sempre uma probabilidade que um evento real seja perdido por causa da rapidez da ocorrência de eventos seguidos. Essas "perdas de tempo morto" podem se tornar severas quando se depara com uma alta taxa de contagem, e qualquer medição precisa feita sobre essa circunstância deve ser incluída alguma correção por essas perdas (KNOLL, 2010).

4 CLIMA ESPACIAL

O termo espacial pode possuir definições e significados distintos para diversas áreas. Na Astrofísica, por exemplo, se trata do conjunto de elementos exteriores a Terra, como os planetas do Sistema Solar até galáxias distantes. Já no caso da Geofísica Espacial usa-se esse conceito para identificar o ambiente entre o Sol e a Terra, dentre eles a coroa solar, a cromosfera, espaço interplanetário (Terra-Sol), magnetosfera, e Ionosfera terrestre. Assim, entende-se como clima espacial o estudo da interação Sol-Terra no que diz respeito a fenômenos que interferem direta ou indiretamente as atividades humanas. Entre essas, por exemplo, tem-se a operação de satélites, em que alguns eventos solares de alta emissão de radiação podem alterar suas órbitas, danificar componentes eletrônicos ou interferir na comunicação. Desse modo consideramos a definição adotada pelo setor de clima espacial do INPE, [ESTUDO E MONITORAMENTO BRASILEIRO DO CLIMA ESPACIAL - EMBRACE \(2014\)](#) (Estudo de Monitoramento Brasileiro do Clima Espacial): O clima espacial abrange as condições e os processos que ocorrem no espaço, que têm o potencial de afetar o ambiente próximo à Terra e/ou o ser humano ou os atuais ativos tecnológicos.

A Terra, assim como alguns outros corpos celestes, possui um campo magnético bem definido com configuração preferencialmente dipolar. A interação do plasma expelido pelo Sol continuamente no meio interplanetário (vento solar) com este mesmo campo, delimita e esculpe a magnetosfera terrestre. O vento solar ao encontrar as linhas de campo terrestres exerce pressão sobre a mesma comprimindo-a até um ponto de equilíbrio, i.e quando a soma da pressão do campo terrestre com o plasma confinado nele se iguala a pressão do vento solar ([KIVELSON, 2007](#)). Essa fronteira, mais expressiva no lado diurno, é chamada de magnetopausa. Comumente alguns eventos do clima espacial possuem assinaturas correspondentes a variação da distância dessa região limite a superfície terrestre. Na posição oposta, ou seja, o lado noturno tem-se uma estrutura magnética alongada, fruto de reconexões com o campo do vento solar ao afastar da Terra. Chamada de magnetocauda. Esta região abriga fenômenos de injeção de partículas para regiões mais internas da magnetosfera, e que oferece grande risco aos dispositivos espaciais próximos a Terra.

4.1 Física de Plasma

O Sol mantém sob alta pressão e temperatura uma mistura de diversos elementos químicos, sendo o hidrogênio e hélio os mais abundantes. Nessa circunstâncias, os átomos estão totalmente ionizados e expressam um comportamento coletivo em resposta a rede forças de Coulomb de suas cargas. Configura-se assim como um estado

físico de plasma (assim como, sólido, líquido e gasoso) que exibe propriedades únicas. Uma delas é referente a alta sensibilidade a campos magnéticos e elétricos, gerados internamente ou induzidos externamente. Um plasma pode ser classificado como magnetizado ou não, ou quanto a sua temperatura: frio, morno ou quente. Para descrever a dinâmica coletiva do plasma usa-se três metodologias. A primeira leva em conta a contribuição individual de cada partícula e sua influência sobre as outras. Um exemplo de aplicação desse método é na estimação e descrição do movimento de elétrons e prótons sujeitos ao campo magnético terrestre que leva a formação do cinturão de radiação. Outra abordagem utiliza-se de conceitos da hidrodinâmica, ao analisar o plasma como um fluido, denominando-se magneto-hidrodinâmica. É usada geralmente quando uma descrição macroscópica é necessária, como no caso da interação morfológica do vento solar com magnetosferas planetárias. E por fim, a análise por modelos estatísticos de distribuição das partículas, usada, por exemplo, para descrever o comportamento médio do plasma em situações de reconexão magnética.

4.2 O Sol

O Sol é talvez o corpo celeste mais enigmático do nosso Sistema Solar, e muitos de seus fenômenos continuam um mistério para a ciência. Consiste em um desafio da comunidade científica atual, compreender como o sol varia, descrever com precisão a variação do ciclo solar, das emissões solares e como a Terra e o sistema solar respondem a tais comportamentos. Como já foi dito, o seu núcleo está sujeito a constantes reações físicas de fusão atômica que liberam enormes quantidades de energia. Esse processo permite grande movimentação de cargas no interior solar que induzem campos magnéticos intensos. O campo magnético do Sol é gerado e modulado pelo dínamo solar, o qual é mantido pela rotação diferencial do Sol e por processos de convecção. O Sol libera energia de duas maneiras: o fluxo de luz padrão que ilumina a Terra e torna a vida possível; mas também em uma forma mais dramática, com emissão esporádicas de intensas rajadas de luz, partículas, e campos magnéticos que podem ter efeitos perturbadores em todo caminho até as bordas do sistema solar. Os estudos do Sol visam entender melhor como sua variabilidade influencia a Terra, os outros planetas do sistema solar, e o meio interplanetário (ESA/NASA/SOHO, 1995).

Estima-se que o Sol detêm cerca de 99.8% da massa de todo Sistema Solar, o que justifica a adoção de seu nome. Devido a sua grande massa, seu núcleo é sujeito a imensas pressões e temperaturas capazes de ionizar qualquer elemento, sendo então

constituído por plasma. Essa característica torna possível violentas reações físicas de fusão com extrema liberação de energia. Íons de hidrogênio fundem-se em hélio. Desse processo origina-se toda dinâmica solar, configurando suas camadas, seu campo magnético e assim toda atividade solar.

Diferente do que é geralmente observado nos planetas com atmosfera, onde existe uma camada gasosa bem delimitada envolvendo sua superfície, o Sol possui uma atmosfera dinâmica que se estende por até 130 unidades astronômicas (distância média entre a Terra e o Sol). Todos os planetas do nosso sistema solar estão imersos em sua atmosfera. Devido a alta temperatura, o plasma da superfície difunde para o meio interplanetário (vento solar) e interagem com os corpos celestes (planetas, satélites, cometas, entre outros) no seu caminho. Soma-se a essa interação, outros fenômenos que ejetam material para fora do Sol por influência do comportamento de sua magnetosfera, a qual acelera o plasma da superfície, como as chamadas ejeções de massa coronal ou CMEs (*Coronal Mass Ejection*), originárias de reconexão magnéticas. Os efeitos da interação dos eventos solares nos corpos celestes do nosso sistema são muitos, e atualmente, por exemplo, são estudados como agentes ativos na modelagem da atmosfera de muitos planetas (SPREITER et al., 1970). Particularmente na Terra, esses fenômenos podem influenciar a vida tecnológica humana, interferindo em comunicações, dispositivos eletrônicos ou na operação de satélites no ambiente espacial próximo a Terra.

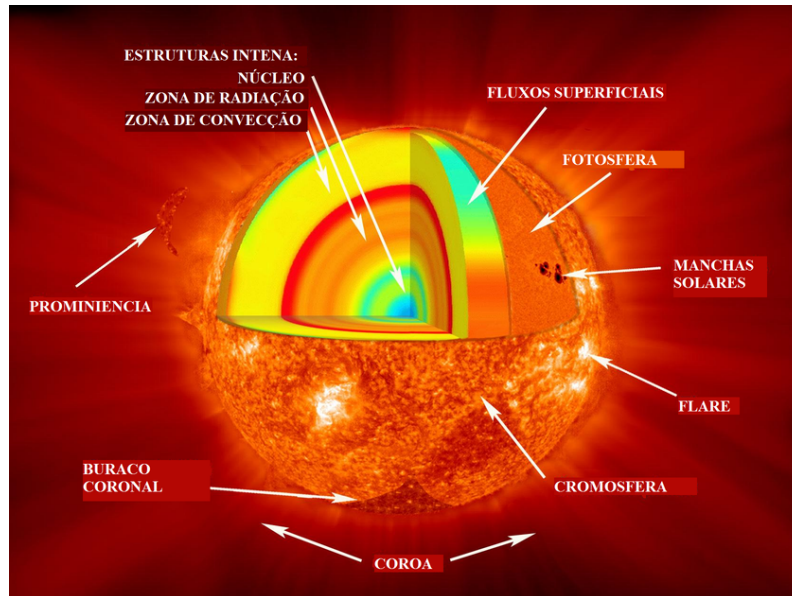
4.2.1 Estruturas

Entender o comportamento solar atual também envolve conhecer o seu passado. Desse modo pode-se identificar eventos anômalos e comuns. Isso é possível com o estudo de séries históricas de diferentes fontes, seja elas frutos de registros humanos ou naturais. No trabalho de Usoskin (2017), por exemplo, tem-se uma estimativa da atividade solar ao longo do milênio através do estudo de assinaturas de isótopos específicos presentes em certos elementos na Terra, tal como os anéis de árvores antigas ou em núcleos de gelo. Moldwin (2008) explica que, com base em dados de outras estrelas, aliado a estimativas da idade de asteroides, acredita-se que o Sol tenha cerca de 4,5 bilhões de anos. No seu trabalho, é sugerido que a formação da nossa estrela aconteceu em uma nebulosa que em algum momento adquiriu uma aglutinação maior de massa em determinado ponto, e com isso atraiu uma quantidade cada vez maior de gás ao seu redor. Com o aumento da gravidade o material desse corpo ficou mais denso, assim como também aumentou-se sua pressão e temperatura (lei de gás ideal $P = nkT$). A evolução crescente desses parâmetros chegou

em um limite que se tornou possível a fusão nuclear (cerca de 15 milhões de Kelvin). Nessa temperatura todo material é ionizado, e o hidrogênio que formava a nebulosa libera um elétron, o hidrogênio ionizado se comportando como um único próton. Desse modo a fusão nuclear no interior solar une prótons e forma-se hélio. A estrela se torna estável quando existe um equilíbrio entre a força da gravidade atraindo o material para o centro e a força devido a pressão de gás repelindo-o para fora (MOLDWIN, 2008, pg 18).

Com os dados solares de grande faixa temporal, seja com assinaturas naturais ou observações humanas, criou-se o modelo padrão do Sol. O modelo padrão atual do Sol é definido como a mais plausível suposição tendo em vista os melhores dados físicos disponíveis do astro. (STIX, 2012) A partir desse modelo, compreende-se que o Sol pode ser separado em seis zonas, as quais são definidas tomando-se a semelhança de características e origem de fenômenos. Assim, a Figura 4.1 apresenta uma ilustração desse modelo, em que se evidenciam as seis zonas: núcleo, zona de radiação, zona de convecção, fotosfera, cromosfera, coroa solar. A região mais interna onde ocorrem as fusões nucleares, chamada de núcleo, é a mais densa com maior temperatura e pressão. Envolta do núcleo tem-se uma camada conhecida por zona de radiação, onde o transporte de energia é feito apenas por fótons, já que a grande pressão restringe a mobilidade das partículas. Ao afastar do centro solar, a pressão tende a diminuir e permite também o transporte de energia por calor. Assim, no limite da zona radiativa inicia-se a zona de convecção, com comportamento dinâmico devido ao transporte convectivo de calor. Acima dessa zona, tem-se a superfície solar a qual é visível da Terra, denominada fotosfera. São visíveis aqui a principal assinatura da atividade solar, isto é as manchas solares. Distanciando-se da fotosfera, a densidade de partículas diminui e assim a temperatura é maior, contudo essa região emite menos luz sendo ofuscada pela alta iluminação da fotosfera. Esta parte oculta é chamada de cromosfera e pode ser visualizada através de instrumentos com bloqueadores da fotosfera ou em um eclipse solar. Na sequência, depois da cromosfera, tem-se uma camada marcada pelo limite de equilíbrio entre a pressão do plasma e a atração gravitacional. Isso forma uma fina fronteira de transição onde pode-se visualizar o plasma solar se despreendendo do Sol difundindo-se no meio interplanetário, cada vez menos denso e mais translúcido, numa região conhecida como Coroa solar.

Figura 4.1 - Ilustração destacando as principais estruturas solares (núcleo, zona de radiação e convecção, fotosfera, cromosfera e coroa) e algumas secundárias (prominências, flares, buraco coronal, manchas solares).



Fonte: Adaptado de National Aeronautics and Space Administration (NASA) (2010).

O núcleo solar é tão denso que toda transferência de calor é feita por radiação eletromagnética. Para a radiação gerada pelo núcleo alcançar a camada superior de convecção demora-se entorno de 170000 anos (NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA), 2010). Em zonas onde a pressão exercida pela gravidade solar é comparável a pressão do gás, o plasma pode mover-se com mais facilidade dando possibilidade a transferência térmica também por convecção. Ela esta localizada a cerca de 200.000 km da superfície visível do Sol. Essa zona de convecção é caracterizada por uma rede de transferência de calor onde correntes quentes ascendentes alternam com correntes descendentes mais frias. Segundo Moldwin (2008) o calor do núcleo solar é transferido para sua superfície na forma de radiação eletromagnética e que em certo ponto no interior da estrela, o fluxo do fluido pode efetivamente iniciar essa transferência por convecção. Assim o gás é aquecido por baixo, sobe até a superfície, emite radiação (e calor) para o espaço, esfria e afunda novamente. A radiação produzida no núcleo ao encontrar essa configuração do fluido em movimento, sofre espalhamentos e criam padrões de interferência. Os heliosismólogos estudam esses padrões para entender melhor como é a dinâmica do plasma no interior do Sol (STIX, 2012).

As estruturas mais externas do Sol, a fotosfera e a cromosfera, são as regiões mais bem estudadas do astro por causa pela facilidade de observação direta. As estruturas vistas por Galileo em 1610, as manchas solares, são localizadas na fotosfera. (MOLDWIN, 2008, 7) A aparência escura registrada por Galileo é devido a temperatura, cerca de 4500K, comparado ao resto da fotosfera, 5800 K. Foi também a partir da observação das manchas que se estimou a rotação solar, Richard Carrington descobriu que o Sol apresenta rotação diferencial, a velocidade radial do equador (25 dias) é mais rápido que a dos polos (36 dias).

4.2.2 Campo Magnético Solar

A atividade solar é compreendida como consequência do comportamento do seu campo magnético. Por se tratar de uma estrela, o campo magnético é dinâmico, além disso, existem componentes de multipolos de ordem superior e complexo com inúmeras componentes de diferentes polaridades. Em meio a esses termos multipolos observa-se uma parte do campo mais coerente com característica dipolar.

O equador magnético é uma região de divisão entre as polaridades de campo. Linha de campo originada em um hemisfério conecta-se ao oposto bem perto da superfície. O plasma da fotosfera acompanha essas linhas, ditas fechadas, com aparência de laços. Ao se afastar do equador magnético, perto dos polos, as linhas de campo fazem um caminho maior para se conectarem, e assim classificadas como região de campo abertas (se fecham no limite da heliosfera). Em imagens solares obtidas na faixa de frequência de raios X, essas regiões aparecem escuras e são chamadas de buracos coronais. O plasma sobre a ação de linhas fechadas possuem menores velocidades de difusão. Em linhas abertas entretanto, o plasma atinge velocidades maiores, devido sua extensão. Ao utilizar técnicas de medidas baseadas no efeito *Zeeman*, torna-se possível determinar espectroscopicamente a intensidade de campo em várias regiões solares (MOLDWIN, 2008).

Dados observacionais mostram que o campo magnético do sol inverte sua polaridade em intervalos de tempo de 11 anos, sendo que em 22 anos retorna a mesma orientação. Esse comportamento é consequência da atividade solar, visto a grande quantidade de energia proveniente das reconfigurações magnéticas, principalmente em regiões de polaridades diversas. No início da primeira parte de um ciclo, predominam-se as configurações de campo dipolar. Os termos multipolos estão em menores quantidades e amplitude, mas não desprezível, assim a atividade solar é menor. Com o avanço do ciclo esses termos multipolos aparecem em maior frequência e amplitude o que contribui para o aumento da atividade. A real causa desse comportamento

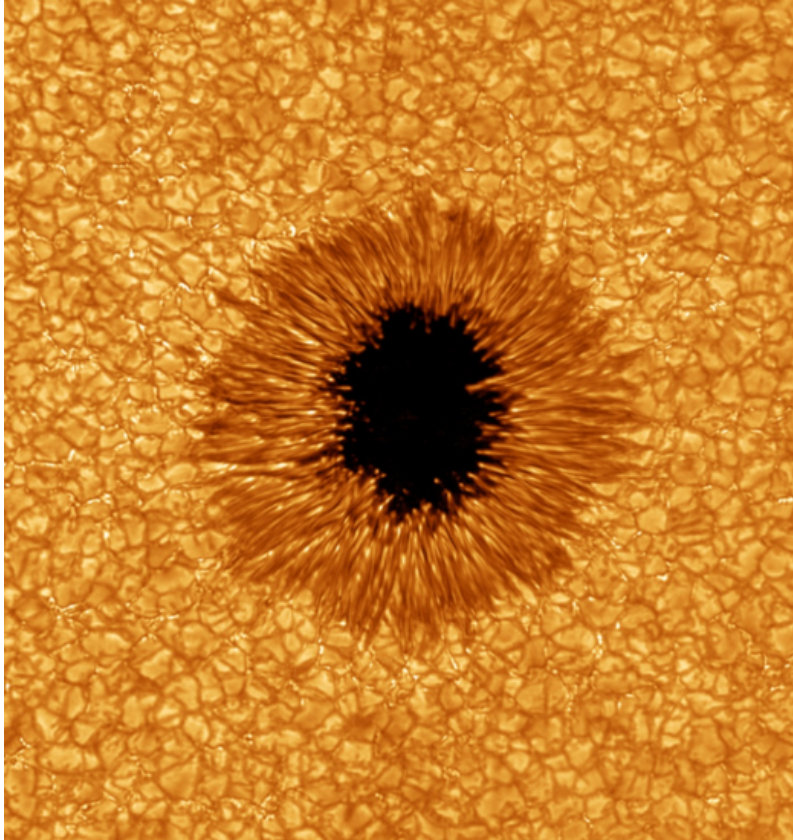
ainda é pouco conhecida. Contudo sabe-se que a rotação diferencial solar influencia esse processo. O equador solar rotaciona em velocidade maior que a dos polos. Como o fluxo de plasma na superfície, sensível ao campo magnético, está em rotação, o campo é desviado mais fortemente no equador no sentido da rotação do que nos polos. Assim, as manchas solares são regiões em que campo magnético é complexo e concentra energia e condições para que haja reconfiguração magnética. Todas essas características levam a ocorrência de grande liberação de energia a partir das manchas solares.

As manchas solares vistas na fotosfera são regiões com intensidade de campo magnético muito elevadas, até 1000 vezes mais fortes que a superfície. Essa característica interfere na convecção normal de calor o que deixa o plasma mais frio e menos brilhante nessa região. Isso explica a cor negra observada em seu interior. Além do campo magnético intenso, esse também é muito coerente, de modo que cada mancha possui uma polaridade bem definida. Geralmente, as manchas se formam em pares, sendo as partes com polaridades magnéticas inversas. As linhas de campo saem de uma mancha com polaridade norte e reencontra a mancha com polaridade sul. Toda mancha tem a mesma configuração magnética do hemisfério que a encontra. Assim se uma mancha no hemisfério Sul é um norte magnético, todas as manchas formadas nesse hemisfério terão a mesma configuração, e seus respectivos pares no hemisfério Sul terão configuração magnética oposta (MOLDWIN, 2008, p28).

A figura 4.2 mostra uma fotografia de uma mancha solar. A granularidade observada no seu entorno é devido ao movimento de troca de calor da camada convectiva, comentada anteriormente. A escala dos grãos podem atingir tamanhos maiores, o que assinala células convectivas de grandes de troca de calor. Áreas mais claras mostram um desvio para o azul devido ao efeito Doppler, assim estão afastando do Sol. As áreas mais escuras se movimentam para dentro do astro, o que é evidenciado pelo desvio para o vermelho. Acima dessa camada (fotosfera), tem-se a cromosfera com cerca de 1500 km de espessura. Nela a densidade do plasma é menor, diminuindo tanto sua opacidade quanto a quantidade de luz emitida. A visualização de seus limites é dificultada, dado o ofuscamento pela luminosidade das camadas anteriores. Entretanto quando tem-se obstrução da fotosfera, em eclipse por exemplo, pode-se ver sua configuração com mais clareza. Nessa situação observa-se jatos de gás (espículas) com extensões gigantes para fora da superfície. Essa estrutura é formada pelo plasma expelido pela superfície, com velocidades de 20 a 100 km/s, o qual é conduzido pelo complexo campo magnético solar. Outro meio de observar a cromosfera é através de instrumentos com filtros específicos. Usa-se geralmente filtros para

destacar comprimentos de onda de emissão do hidrogênio ($H - \alpha$). Com essa técnica é possível visualizar uma rede de conexões em formato de teia que contornam os grãos de convecção. Espículas e prominências solares podem ser encontradas nos limites dessas células (MOLDWIN, 2008).

Figura 4.2 - Fotografia de uma mancha solar.



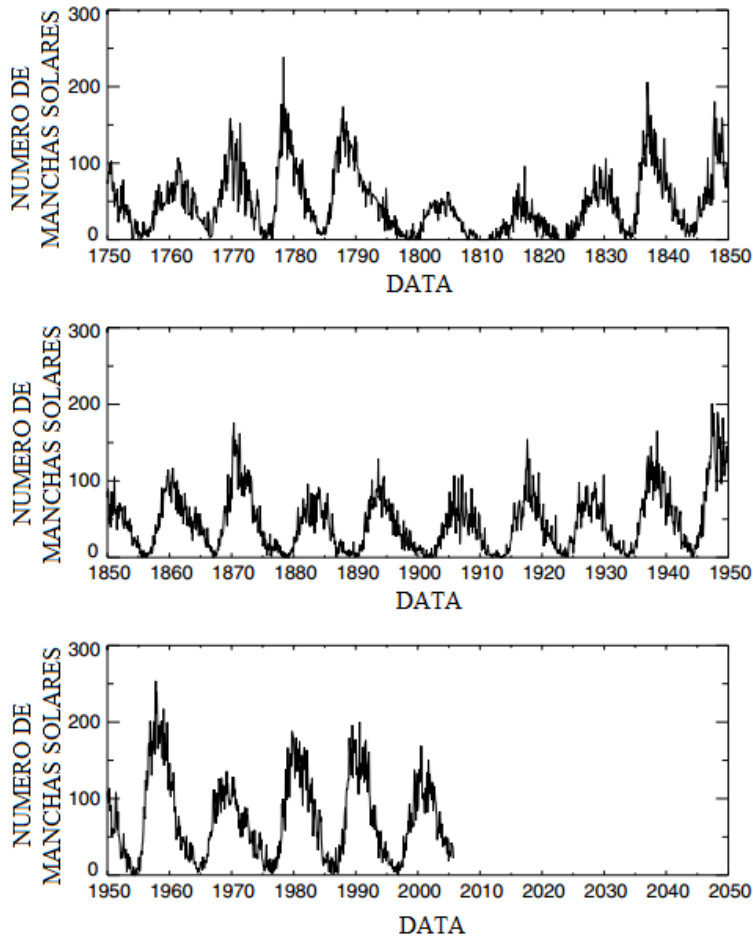
Fonte: BIG BEAR SOLAR OBSERVATORY (2010).

Muitos dos pares de manchas solares estão associados a eventos de grande liberação de energia pela fotosfera (MOLDWIN, 2008, p28). Os fenômenos envolvidos nessas regiões, ditas de atividade, ainda não são totalmente esclarecidos. Contudo, sabe-se que estão relacionadas com as conversões rápidas de energia magnética para a cinética das partículas do plasma. A estrutura magnética formada entre dois pares de manchas geralmente acelera o plasma da superfície orientando no caminho da linha de campo, formando estruturas semelhantes a laços, chamadas prominências. As linhas de campo magnético solar sofrem constantes distorções devido a rotação

diferencial do equador e dos polos. Desse modo ocorre variações grandes de fluxos em algumas regiões, e dessa variação tem-se uma súbita aceleração das partículas do plasma da fotosfera. Como a característica básica de uma mancha solar é sua grande intensidade magnética, nessa região a liberação de energia é também maior. Entre os fenômenos que podem ser desencadeados por esse evento tem-se as emissões de massa coronal (em inglês Coronal Mass Ejection - CMEs) e os flares (rápida liberação de radiação de alta energia em larga faixa espectral).

Nesse sentido quando observa-se grande quantidade de manchas solares consequentemente a atividade solar é maior, assim mais provável que eventos de grande liberação de energia aconteça. Dado o ciclo de atividade solar de 11 anos o tempo de picos de grande atividades (máximo solar) e de baixa (mínimo solar) é de aproximadamente 5 a 6 anos (MOLDWIN, 2008). Tem-se dados da quantidade de manchas solares desde 1750. A Figura 4.3 mostra um gráfico com números de manchas observadas desde essa data ate meados de 2005.

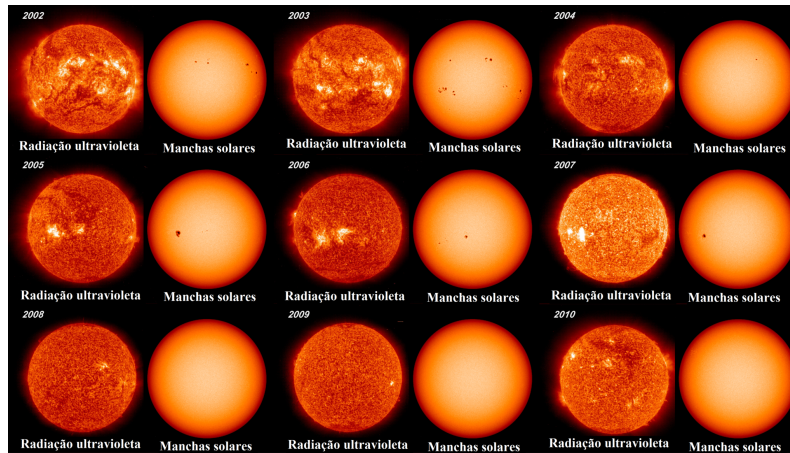
Figura 4.3 - Gráfico com quantidades de manchas solares identificadas em quase 3 séculos de observações.



Fonte: [Moldwin \(2008\)](#).

Outra forma de estimar a atividade solar é pela emissão de raios X. Quando um gás é aquecido a cerca de 1 milhão de graus Kelvin existe emissão de radiação com grande energia, entre elas o comprimento de onda de raios X. Durante um máximo solar tem-se várias regiões brilhantes nesta faixa de frequência de radiação. Em um mínimo solar a atmosfera é vista mais escura na faixa de raios X. Na figura 4.4 tem-se fotografias do Sol num período de nove anos, são destacados as regiões de emissão de radiação ultra violeta, pela esquerda, e as manchas solares, na direita.

Figura 4.4 - Fotografias do Sol tiradas pelo satélite SOHO destacando as emissões de radiação ultravioleta (esquerda) e as manchas solares (direita) em 9 anos de atividade (2002-2010).



Fonte: Malanoski e Jentoft-Nilsen (2013).

4.3 Ejeção de Massa Coronal

As chamadas ejeções de massa coronal (do inglês CME – Coronal Mass Ejection) são um caso desses fenômenos onde em regiões de reconexão magnética afetam o plasma da coroa, expelindo-o para fora do Sol a altas velocidades (1000 km/s). Segundo Schwenn (2010), define-se uma Ejeção de Massa Coronal (CME) como sendo uma mudança observável na estrutura da coroa solar que 1) ocorre em um intervalo de tempo de poucos minutos a algumas horas e 2) e implica na aparência (e movimento para fora) de uma nova, discreta, brilhante, característica luz branca no campo de visão de um coronógrafo. Podem levar de três a um dia para atingir a Terra. O plasma de uma CME é expelido para o meio interplanetário junto ao vento solar. A Figura 4.5 mostra uma foto no momento de ejeção da nuvem de partículas. Devido a velocidade de ejeção ser maior que a do som no meio do vento solar, forma-se frentes de choque que aceleram também as partículas do vento. Desse modo, as CMEs podem transportar para a magnetosfera terrestre, partículas de alta energia, sendo considerado um evento chave para a formação de tempestades geomagnéticas.

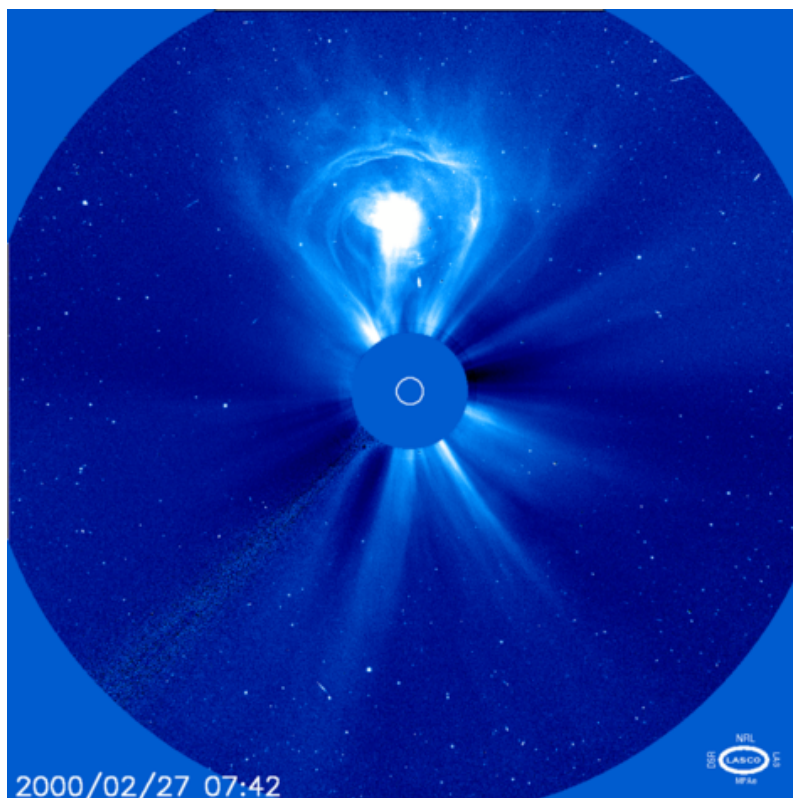
As CMEs se formam na coroa solar e são distinguíveis pelo seu formato de laço quando estão prestes a ser expelidas. No deslocamento dessa estrutura pelo meio interplanetário, podem-se distinguir nuvens magnéticas associadas as CMEs. As

propriedades do plasma e do campo magnético dessas nuvens são características que a classificam quanto ao nível de perturbação que pode ser causado no sistema Solar-Terrestre.

Dizemos que o vento solar está perturbado quando a intensidade de seus parâmetros ultrapassa limites considerados padrões. Os parâmetros usados para descrever o vento solar esta relacionado com o plasma transportado. Geralmente é observado a temperatura, velocidade, direção e intensidade do campo magnético, entre outros, para classificar a perturbação do vento solar.

Eventos intensos que promovem a intensificação do campo magnético interplanetário podem trazer sérios problemas a vários satélites em órbita na Terra. A nuvem de plasma produzido por uma CMEs ou, o vento solar acelerado a partir de buracos coronais, podem comprimir a magnetosfera de tal maneira que expõe ao vento solar vários dispositivos em órbita, os quais ficam vulneráveis a radiação sem a proteção do campo magnético terrestre.

Figura 4.5 - Fotografias do Sol no momento de um evento CME.



Fonte: Fox (2014).

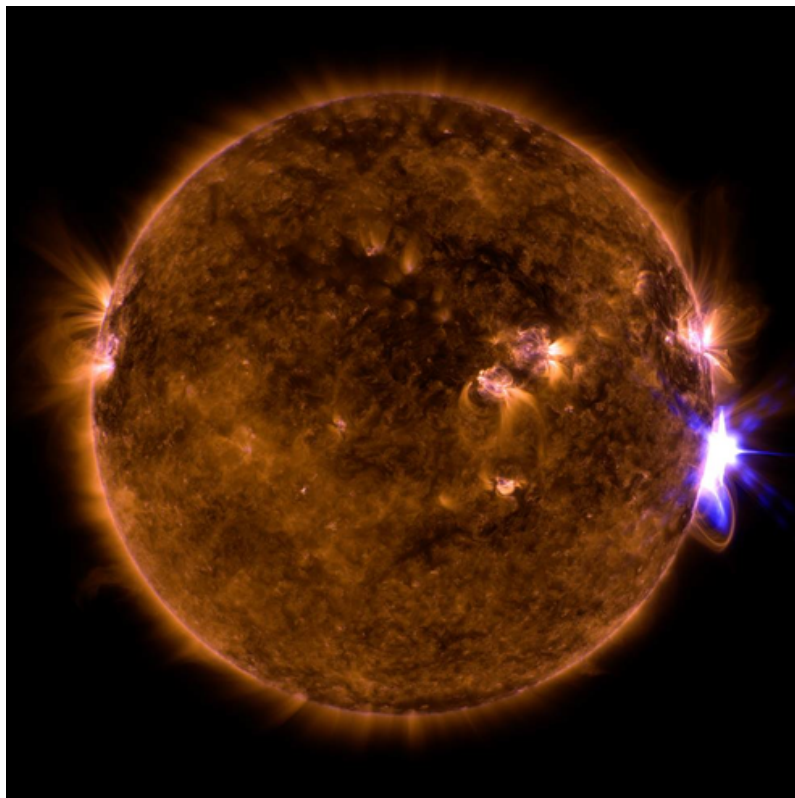
4.4 Flares

Além das CMEs os Flares também são relacionados a dinâmica de uma mancha solar e suas reconexões. Eles são observados como flashes de luz intensa e rápidos (alguns minutos) na superfície solar em regiões próximas a manchas. No ponto que os flares ocorrem, a temperatura podem chegar até 100 milhões de graus Kelvin, e por essa razão emite radiação eletromagnética em um vasto comprimento de onda. Além disso ejetam para o espaço partículas com velocidades próximas a da luz, as chamadas partículas super energéticas (do inglês, *Super Energetic Particles* - SEP). Os flares são muito estudados pelo clima espacial pois, se direcionado, pode impactar a Terra. "Os flares solares são certamente um dos mais dramáticos, energéticos e rápidos processos em nosso sistema solar que conhecemos. Os flashes de radiação eletromagnética são liberados em segundos a minutos podendo cobrir uma faixa de comprimentos de onda tanto quanto 17 ordens de magnitude: de ondas de rádio

quilométrica passando pelo espectro infravermelho, visível e UV até raios-X e até mesmo raios-*Gamma* (SCHWENN, 2010).

Devido ao seu grande espectro de emissão, os Flares são observados como grandes pontos muito brilhantes com duração curta. Geralmente a energia emanada por esses eventos estão na ordem de 10^{19} J para eventos pequenos e 10^{25} J em maiores. Parte desse energia se transforma em radiação, o resto transforma-se em calor ou acelera partículas (SCHWENN, 2010). Em algumas imagens de Flares, adquiridas por satélites, é comum ver pontos brilhantes de saturação causados pelas partículas de alta energia. A Figura 4.6 mostra a ocorrência de um flares no limbo solar na direção nordeste.

Figura 4.6 - Fotografias do Sol no momento de um evento Flare.



Fonte: Fox (2017).

4.5 Partículas Super Energéticas

Um outro evento que pode ser desencadeado pelas reconfigurações magnéticas é o de aceleração de partículas. Esse fenômeno pode acelerar íons próximos a velocidade da luz com energias na escala de GeV, os SEP. Existe uma preocupação particular com esses eventos pois, dado sua grande energia, podem atravessar blindagem de radiação e danificar componentes de instrumentos no espaço. Geralmente se formam próximo a regiões dos flares, e devido a alta velocidade podem atingir a Terra em poucos minutos depois do flash de luz (SCHWENN, 2010).

4.6 Vento Solar

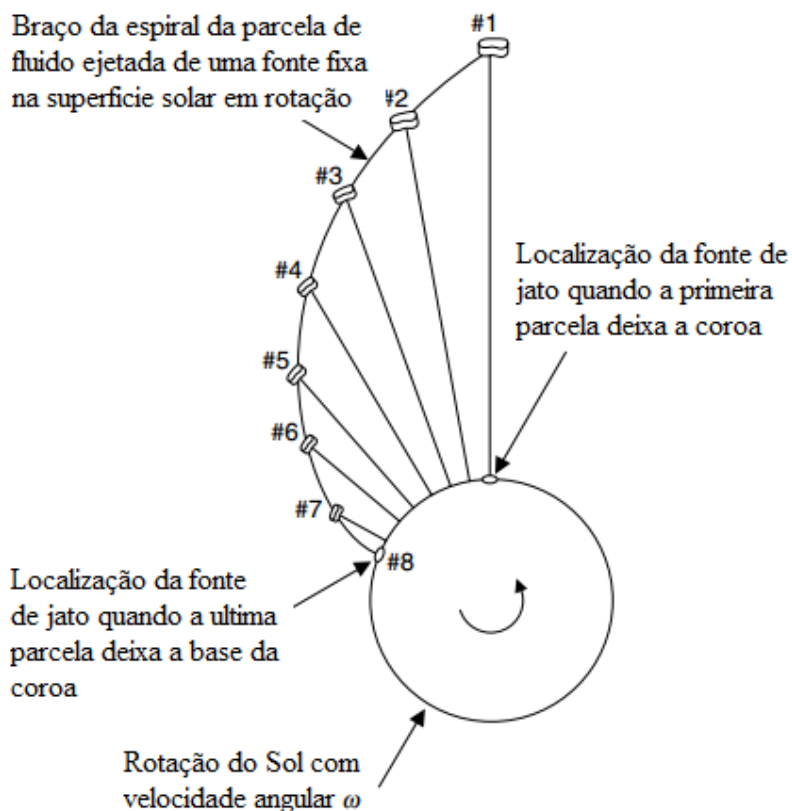
Um dos ambientes monitorados pelo clima espacial é o meio interplanetário, onde se propaga o vento solar. Esse é caracterizado pelo fluxo contínuo de partículas difundidas pelo Sol devido sua atmosfera dinâmica que se expande termicamente e libera partículas (MOLDWIN, 2008). Segundo Moldwin (2008) para começar a entender esse fenômeno foi necessário anos de estudos sendo considerado seu marco inicial o trabalho de Chapman e Ferraro. Eles observaram que em tempestades geomagnéticas a componente H (medida do campo magnético na superfície terrestre) era aumentada e deduziram que partículas provenientes do Sol comprimiam o campo magnético terrestre causando esse efeito. Na sequência histórica L. Bierman ao estudar as caudas de cometas concluiu que deveria existir um fluxo contínuo de partículas solares, o qual chamou de vento solar, que explicasse o comportamento radial de sua cauda dada sua trajetória Stix (2012). Somente da década de 60 com a sonda Mariner 2 em sua viagem a Vênus, foi possível adquirir dados *in situ* do meio interplanetário e confirmar a existência de um contínuo supersônico fluxo de partículas (predominantemente elétrons, prótons e partículas alfa) (STIX, 2012).

O plasma expelido pela fotosfera é orientado pela ação do campo magnético solar local, e mantém a configuração magnética que foi submetido na superfície, dado a uma propriedade específica desse estado da matéria (plasma) chamada de congelamento do campo magnético. Cada ponto da superfície solar está submetida a uma configuração magnética específica. Com telescópios é possível observar filamentos com maior luminosidade, compostos de partículas aceleradas, que mapeiam o campo magnético na sua região. Sendo que quando orientados por campos fechados visualiza-se um laço e abertos são acelerados para o meio interplanetário. Ao afastar da cromosfera o plasma expelido fica ainda menos denso e a temperatura aumenta drasticamente. Desse modo a pressão do gás se torna maior que a atração pelo Sol, permitindo que esse plasma expanda pelo espaço supersonicamente.

O fluxo constante de plasma expelido pelo Sol nessa circunstância é chamado de vento solar (MOLDWIN, 2008). Em certas regiões de buraco coronal a intensidade de campo é maior, assim acelera-se mais o plasma criando os chamados ventos rápidos. Os grandes buracos coronais nos polos do Sol, são fontes de ventos solares rápidos. A emissão de ventos mais lentos são nitidamente confinados em uma faixa de cerca de 30° com latitude centrada na superfície de corrente (SCHWENN, 2010).

Devido a rotação solar, a emissão de plasma vista por cima do sol (polo) se assemelha a uma espiral. Uma região de campo aberta ejeta plasma continuamente de forma radial. Ao deslocar em sentido da rotação solar, o plasma emitido estará defasado do anterior e com distância radial menor, visto que o plasma anterior avançou radialmente. Ao completar uma rotação completa observa-se o desenho de uma espiral. A Figura 4.7 ilustra esse comportamento.

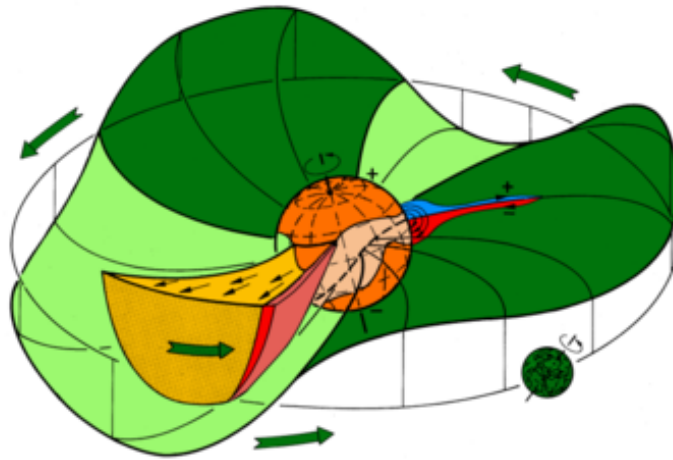
Figura 4.7 - Formato em espiral da ejeção do plasma solar.



Fonte: Moldwin (2008, p39).

Outro efeito que modela o movimento do plasma para fora do Sol é devido a desalinhamento do equador magnético com o eixo de rotação solar. Com essa inclinação, o centro do movimento espiralado é torcido o que gera uma superfície de plasma semelhante a saia de uma bailarina Figura 4.8, segundo alguns autores. Como o plasma acompanha as linhas abertas essa superfície é uma divisão da configuração magnética solar (aberta e fechada) e é chamada de lâmina de corrente heliosférica. Além disso levando em conta a propriedade de memória magnética do plasma expelido, o campo magnético do Sol é transportado pelo vento solar.

Figura 4.8 - Formato "saia de bailarina" da heliosfera.

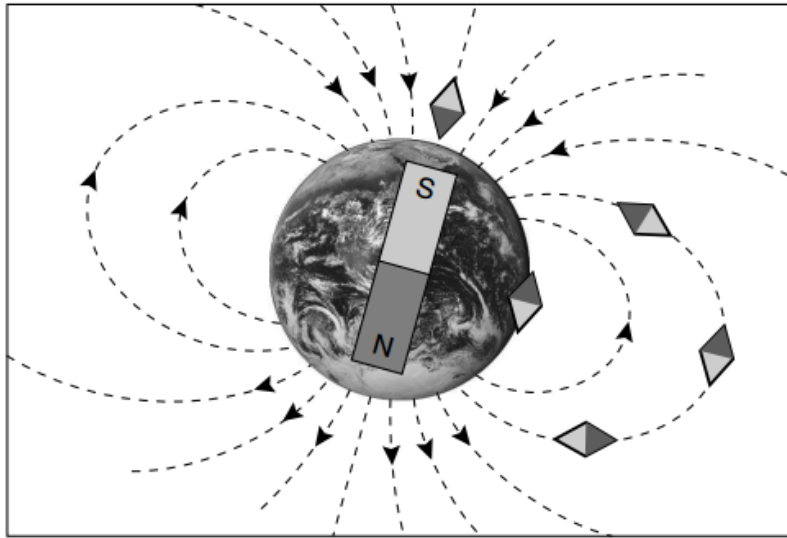


Fonte: Schwenn (2010, p14).

4.7 Magnetosfera Terrestre

O termo magnetosfera é usado para definir a região em que o campo magnético planetário se sobressai ao campo magnético do meio interplanetário (KIVELSON, 2007). Na Terra o campo magnético se forma pelo movimento de dínamo do ferro fundido em seu interior (MOLDWIN, 2008). Observa-se que o campo terrestre se configura como um de dipolo. Na figura 4.9 é mostrada de forma ilustrativa o dipolo magnético terrestre.

Figura 4.9 - Analogia do campo dipolo magnético da Terra como um Ímã.



Fonte: Moldwin (2008).

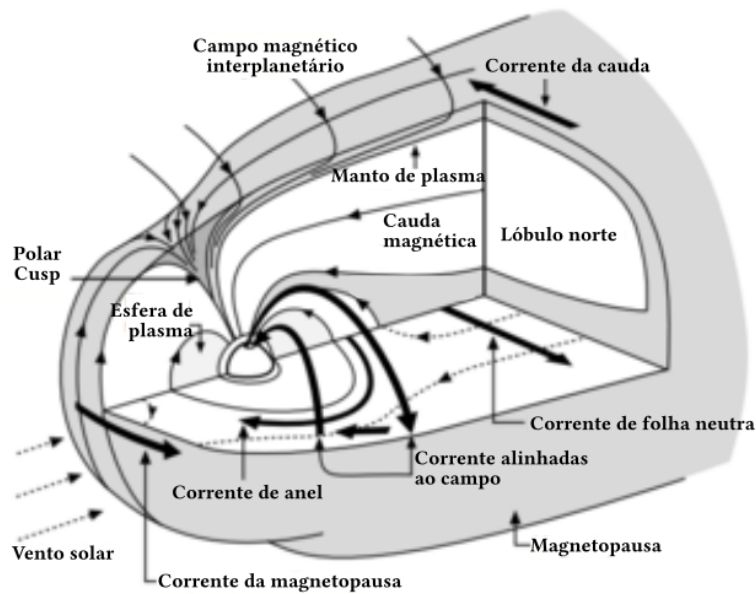
Note que o sentido das linhas de campo é de Sul/Norte geográfico. Além disso, o eixo do dipolo magnético predominante no campo magnético terrestre, está desalinhado cerca de 11° do eixo de rotação terrestre. Na Figura 4.9, o espaçamento entre as linhas de campo indicam a sua intensidade. Assim, nas regiões do polo tem-se um campo mais intenso, cerca de duas vezes maior que o equador. Por se tratar de um campo magnético aproximadamente dipolar, a intensidade decresce com o cubo da distância, numa posição equatorial, (MOLDWIN, 2008):

$$(|B| \propto \left(\frac{1}{r^3}\right)). \quad (4.1)$$

A magnetosfera terrestre é esculpida pelo Vento Solar, formado por plasma magnetizado difundido pelo Sol no meio interplanetário. Na figura 4.10 mostra um modelo artístico destacando algumas regiões básicas da magnetosfera da Terra. No primeiro contato com o campo magnético planetário o vento solar é desacelerado e, por sua velocidade supersônica, forma-se uma camada de choque chamada de “frente de choque”. (MOLDWIN, 2008). A *magnetosheath* é localizada entre o limite da magnetosfera (magnetopausa), e a frente de choque. A distância da magnetopausa no lado diurno varia conforme a pressão exercida pelo vento solar, calculada a partir da sua velocidade e densidade. Na região diurna, a magnetosfera se estende por 10 raios

terrestres (R_e), enquanto no lado noturno se alonga até cerca de $60 R_e$. Quando há compressão da magnetopausa a intensidade do campo visto da superfície é aumentado. Assim, através de magnetômetros na Terra é possível estimar a distância da magnetopausa e conseqüentemente a intensidade do vento solar. Essa informação é útil para prever tempestades geomagnéticas que serão tratadas posteriormente.

Figura 4.10 - Modelo artístico destacando as regiões da magnetosfera. As correntes elétricas que fluem na magnetosfera são dadas pelas setas escuras



Fonte: Moldwin (2008).

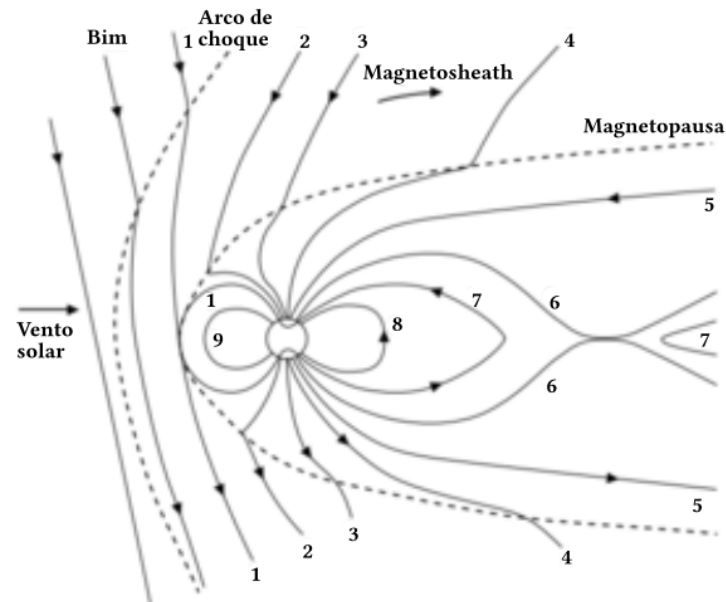
Além da compressão da magnetopausa causada pela pressão do vento solar, este também interfere no formato da magnetosfera através das reconexões magnéticas. No processo de reconexão ocorre grande aceleração de partículas, mecanismo semelhante a atividades da superfície solar. Dado que o plasma é magnetizado e suas linhas de campo interagem com as da Terra. Para facilitar a visualização desse efeito vê-se a analogia na interação entre dois ímãs. Se aproximar polos opostos as linhas de campo estarão alinhadas e assim ambas contribuirão para o aumento da intensidade de campo na proximidade. O contrário é visto ao aproximar polos semelhantes, onde as linhas de campo são opostas e assim a intensidade nas proximidades é subtraída. A figura 4.11 ilustra esse processo, onde as linhas contínuas são os campos magnéticos.

Nesse exemplo a componente magnética do vento solar encontra a magnetopausa em direção oposta. Assim tem-se a formação de linhas ditas abertas da magnetosfera terrestre, onde apenas uma de suas extremidades encontram um hemisfério terrestre e a outra segue o caminho do campo do vento solar (MOLDWIN, 2008).

Com o contínuo percurso do vento, contrário ao Sol, as linhas antes abertas tendem a se reconectarem. Assim é visto um alongamento da magnetosfera, no lado noturno, que se estende a cerca de 60 raios terrestres do centro da Terra. Essa estrutura é chamada de magnetocauda. Na região mais externa dessa ocorre a reconexão das linhas abertas e conseqüentemente tem-se aceleração de partículas para dentro da magnetosfera. Chamado de *plasma sheet* esse fluxo de partículas divide a magnetocauda em dois lóbulos, o Norte e o Sul (MOLDWIN, 2008).

A magnetopausa, e a magnetocauda são estruturas localizadas na chamada magnetosfera exterior, onde o campo magnético é muito influenciado pelo vento solar. Na região dita interna, o campo terrestre preserva sua configuração de dipolo. Aqui está localizado duas estruturas responsáveis pelo armadilhamento de partículas de alta energia: os cinturões de Van Allen. Os cinturões, que levaram o nome em homenagem ao físico James Alfred Van Allen (1914-2006) cujo experimento espacial levou a descobertas dos cinturões, armadilham partículas com energias próximas a relativísticas (velocidades próximas a da luz). Os mecanismos que mantêm essas partículas nessas região serão tratados em seções posteriores (MOLDWIN, 2008).

Figura 4.11 - Esquema ilustrando a interação magnética do vento solar com a magnetosfera.



Fonte: Moldwin (2008).

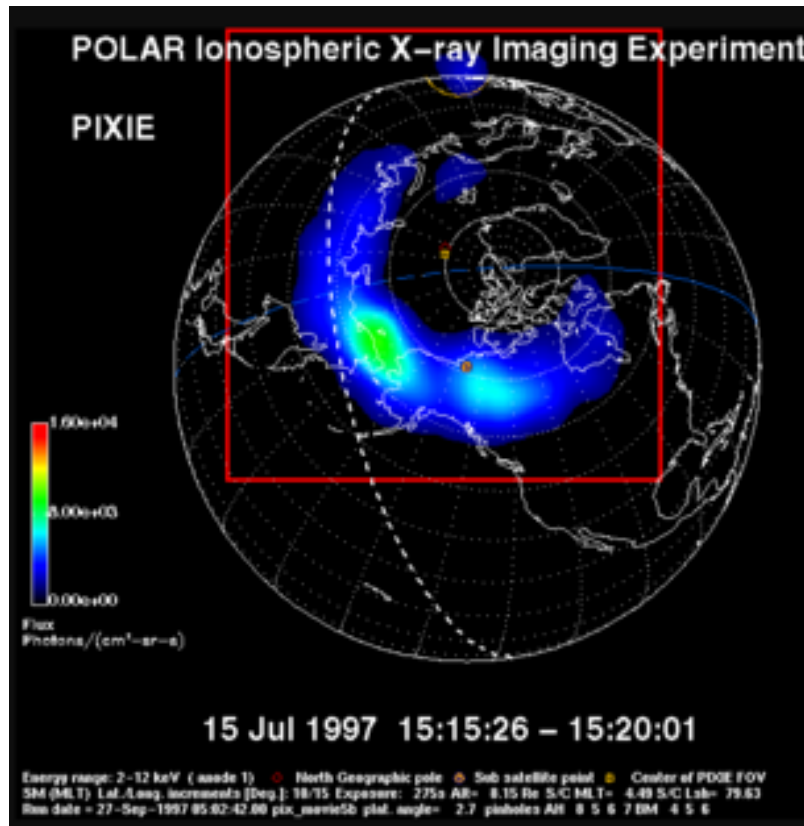
Dentro da magnetosfera interna existe um fluxo de partículas que contornam a Terra em formato toroidal centrado no plano equatorial. Sua densidade é variada e alcança distâncias entre dois a nove raios terrestres. Pela presença do campo magnético terrestre as partículas aprisionadas nesta região sofrem um desvio azimutal, onde elétrons se movem na direção oeste e os íons para a leste. Pelo transporte de cargas ocasionado por este movimento, origina-se uma corrente elétrica dita corrente anelar. (DAGLIS et al., 1999)

A corrente em questão gera um campo em oposição ao da Terra, o que diminui sua intensidade. Quando o fluxo de partículas aumenta repentinamente a magnetosfera terrestre é enfraquecida, o que pode indicar uma tempestade geomagnética. Assim, existem instrumentos que medem constantemente o campo magnético no equador para identificar alterações e anomalias. Tem-se o índice Dst (do inglês, *Disturbed Storm Time Index*), que classifica o desvio de intensidade do campo terrestre a valores considerados normais. Quando o índice é negativo há diminuição do campo (MOLDWIN, 2008).

4.8 Tempestades Geomagnéticas

A quantidade de energia liberada pelas reconexões magnéticas na magnetosfera depende da intensidade de campo magnético do vento solar e de sua orientação. Mudanças no vento solar, e em fluxos de raios cósmicos energéticos, podem acoplar energia, momento, e adicional massa de partículas dentro da magnetosfera e assim conduzir dinâmicas magnetosféricas (KIVELSON, 2007, p532). Um vento solar com a mesma orientação magnética da magnetopausa aumenta o fluxo magnético no lado noturno e assim contribui pela maior injeção energética, seja ela magnética ou cinética de partículas. Esse fenômeno produz diversos efeitos de instabilidade, principalmente no fluxo de partículas, nas regiões mais internas da magnetosfera, levando a um aumento do brilho e expansão de toda região auroral, nos dois hemisférios, Figura 4.12. Em algumas outras, os cinturões de radiação se intensificam e a borda do cinturão externo move radialmente em direção oposta a Terra (MOLDWIN, 2008, p59). Quanto maior a velocidade do vento solar, e a intensidade de campo magnético do meio interplanetário maior serão os efeitos de transmissão de energia.

Figura 4.12 - Foto aurora no hemisfério Norte tirada pelo instrumento PIXIE a bordo do satélite POLAR.



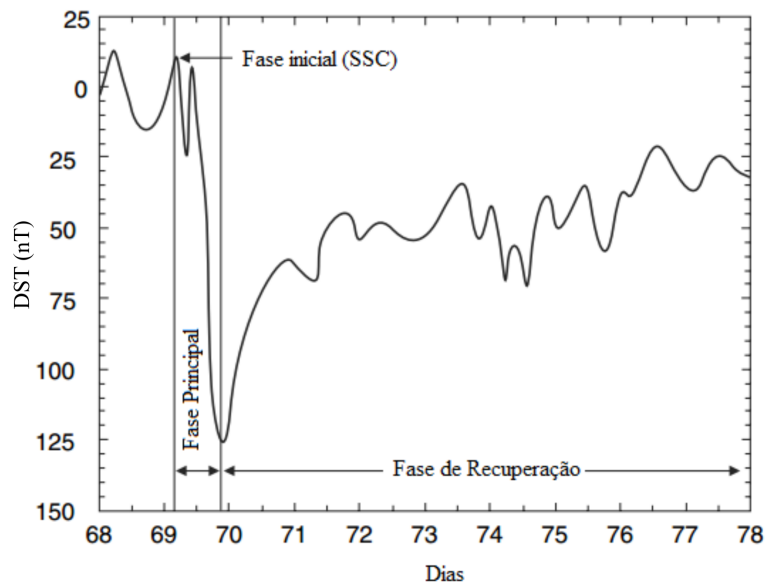
Fonte: Mobilia (1997).

Estamos habituados a ouvir o termo tempestade em alertas de chuva para mudanças drásticas no tempo que trazem grande perigo para uma população local. Os danos são comumente ocasionados pelos grandes fluxos de energia ocasionados por seu comportamento instável. Grandes zonas de convecção pode originar ventos fortes, ou raios podem ser criados pela diferença de carga. Quanto maior o fluxo de energia associado a uma tempestade mais instável ela será e maior os seus riscos. Do mesmo modo, no ambiente espacial tem-se eventos semelhantes a grande fluxo de energia que instabiliza certas estruturas e oferecem riscos a atividade humana, seja em tecnologias espaciais ou terrestres (KIVELSON, 2007).

Os efeitos das tempestades geomagnéticas são identificadas por diversos meios, entre eles com medidas de magnetômetros, espalhamento de ondas na ionosfera e fluxos de partículas medidos por satélites movendo pela magnetosfera. O meio pelo qual se

define a ocorrência e a intensidade de uma tempestade geomagnética é por variações características no campo magnético da Terra dada pelo índice DST. As tempestades geomagnéticas são compreendidas em três fases: fase inicial, principal e de recuperação. A Figura 4.13 ilustra o comportamento do índice DST em uma tempestade. Na fase inicial demarca-se o incremento súbito da componente magnética. Na região da magnetopausa surge uma corrente de plasma (corrente de Chapman-Ferraro), do vento solar e da magnetosfera, que induz um campo magnético intenso. Seu valor pode chegar a 40 nT na superfície terrestre. Geralmente dura cerca de dez minutos a horas, até outra variação repentina do índice DST que marca o início da fase principal, dado pelo aumento da corrente anelar que se sobrepõe a de Chapman-Ferraro. Assim é observado uma queda no índice DST que dura algumas horas até começar a fase de recuperação, onde retorna para valores normais lentamente. De acordo com o índice DST uma tempestade pode ser classificada como calma, fraca, moderada, forte e extrema. Os valores referentes de cada classe são mostrados na tabela Tabela 4.1.

Figura 4.13 - Gráfico ilustrativo com o comportamento do índice DST em uma tempestade geomagnética comum com destaque de suas fases.



Fonte: Moldwin (2008).

Tabela 4.1 - Classificação de tempestades quanto ao índice máximo DST.

Classe	Valor do Índice DST (nT)
Intensa	<-100
Moderada	>-50
Pequena	>-30

4.9 SubTempestades Geomagnéticas

Existem outros distúrbios na magnetosfera terrestre causados pelas tempestades geomagnéticas mas com efeitos localizados. As chamadas subtempestades ocorrem nos polos em latitudes entre 65° a 75° e podem durar algumas horas ou dias. (KIVELSON, 2007, p533) Essa região é conhecida como "polar cap" e é definida pela área onde as linhas de campo magnético terrestre encontra a superfície. Em eventos dessa categoria, a região auroral tem um aumento súbito de brilho em formato de arco que se estende para fora dos polos e a oeste. É associado esse efeito a intensificação da corrente ionosférica auroral (Eletrojato auroral) que são medidas por um índice magnético chamado eletrojato auroral (do inglês, *Auroral Electrojet* - AE). Trata-se de um índice que informa a diferença entre a intensidade de dois sistemas de correntes ionosféricas, a oeste e a leste (MOLDWIN, 2008, p60).

4.10 Aprisionamento e Fluxo de Partículas na Magnetosfera

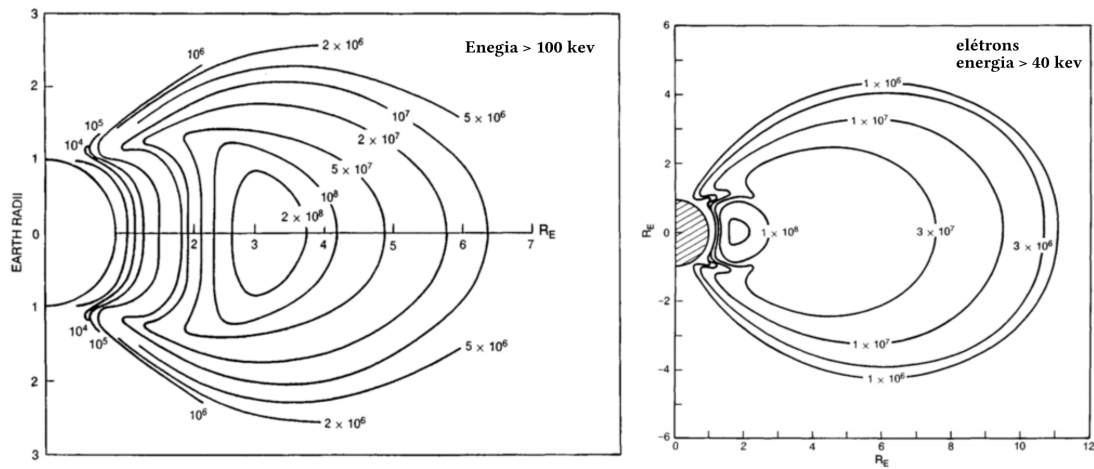
As partículas armadilhadas no cinturão de radiação são provenientes de diversas fontes, tais como a ionosfera, e o plasma do vento solar. De forma geral, uma partícula carregada sob ação de um campo magnético dipolar como o da magnetosfera interna, pode ser aprisionada se certos parâmetros, próprios e de sua interação com o campo magnético, permanecem constantes em um dado período. Chamados invariantes adiabáticos, esse parâmetros são usados para descrever o movimento de partículas carregadas no campo dipolar e podem ser divididos em três movimentos típicos. Qualquer violação na invariância dessas grandezas perde-se a condição de aprisionamento. O primeiro invariante, dito ciclotrônico (*gyro*), se refere ao movimento circular em torno de uma linha de campo da magnetosfera, realizado pela partícula carregada quando seu momento magnético é invariante. A medida em que a partícula se aproxima de um polo a concentração de linhas de campo magnético aumenta e conseqüentemente o ângulo de arremesso das partículas, 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 de espelhamento ou *bounce*. O segundo

invariante adiabático dita que a integral do momento paralelo, calculada ao longo de um ciclo do movimento de espelhamento completo é constante. Por fim, tem-se o movimento de deriva, ou *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.

De forma a reduzir a quantidade de variáveis para descrever o comportamento dos invariantes adiabáticos em regiões próximas a Terra [McIlwain \(1966\)](#) propôs as coordenadas (B,L). De forma simplificada esse sistema de coordenadas permite definir camadas da magnetosfera, também chamadas de *L-Shell*, onde relaciona-se os pontos de espelhamentos de uma determinada linha magnética e as regiões com intensidade de campo magnético equivalentes. No plano equatorial o valor de L pode ser aproximado pela distancia a superfície terrestre na unidade de raio terrestre (RE). Portanto em $L=2$, equivale a 2 RE no plano equatorial.

É usual dizer que os cinturões de radiação consistem em duas zonas, uma próxima da Terra, dentro da camada $L \approx 2.5$ e a externa em $L > 3.5$ aproximadamente. Dados de contagem de partículas carregadas, obtidos por missões nessa região, identificaram alta taxa de contagem com máximos em $L = 1.5$ e $L = 4.5$ e um espaço com fluxo menor entre elas. Os primeiros instrumentos não podiam diferenciar partículas, no entanto, atualmente sabe-se que essas regiões de máximos se devem a alta concentração de prótons e elétrons, respectivamente ([WALT, 1994](#)). Na [Figura 4.14](#) é mostrado com mais detalhe a distribuição de intensidade do fluxo em algumas regiões do cinturão de radiação.

Figura 4.14 - Distribuição omnidirecional, do fluxo de partículas integrado.



Corte meridional. (a) Prótons com energia maior que 10 keV. (b) Elétrons com energia maior que 40 keV.

Fonte: Walt (1994).

Segundo Walt (1994), as regiões apresentadas são um modelo alimentado por medidas de vários instrumentos em órbita e assim seu resultado representa um comportamento médio dos cinturões de radiação. Podem existir variações dos fluxos pelo erro dos instrumentos ou então por variações temporais e espaciais de onde foram feitas as medidas. Todos componentes nos cinturões de radiação, tanto íons quanto elétrons, exibem variações na intensidade de fluxo, espectro de energia e distribuição espacial. Essas variações são o maior motivo de dificuldade de mapear valores médios para propósito de projetos de satélites (WALT, 1994). O autor cita o exemplo de tempestades magnéticas severas, que podem produzir mudanças nas regiões de armadilhamento na magnetosfera.

5 INSTRUMENTOS ESPACIAIS DE DETECÇÃO DE RADIAÇÃO

O atual entendimento do ambiente de radiação próximo da Terra se deu essencialmente pela disponibilidade dos dados de instrumentos em órbita. Para entender os conceitos sobre detectores de radiação inseridos nesse ambiente é portanto necessário revisitar as tecnologias utilizadas por missões antigas. Neste trabalho, buscou-se determinar os conceitos fundamentais de detecção de partículas energéticas, as especificações mais usuais para compor um instrumento detector, através do estudo das principais missões espaciais que se destacaram no estudo do clima espacial, referentes a caracterização dos cinturões de Van Allen. As seções que seguem apresentam um pequeno resumo das características dos instrumentos de cada uma das missões estudadas.

5.1 CRRES/(PROTEL e HEEF)

Em 25 de Julho de 1990 foi lançado o "Satélite de Efeitos Combinados da Radiação" de acrônimo CRRES (do inglês *The Combined Release and Radiation Effects Satellite*). A missão foi idealizada graças ao grande interesse em entender o aumento de falhas em dispositivos espaciais por consequência da radiação. Com uma órbita geossíncrona de transferência, o CRRES teve oportunidade de coletar dados de radiação em diferentes regiões dos cinturões de radiação, tanto o interno quanto o externo. Dentre os muitos objetivos da missão está o monitoramento de partículas energéticas, usadas para em princípio correlacionar a resposta das várias tecnologias a bordo, a esse ambiente radioativo. Os instrumentos disponíveis para esse fim foram sensíveis a várias faixas de energia, mas para detecção de cada espécie de partícula foram usados detector distintos: o fluxômetro de elétrons de alta energia - HEEF (do inglês, High Energy Electron Fluxometer) para elétrons de 0,8 a 8,0 MeV; e o telescópio de prótons - PROTEL (do inglês, Proton Telescope) para prótons com energia na faixa de 1 a 100 MeV. Na sequência, são apresentados os detalhes de cada instrumento.

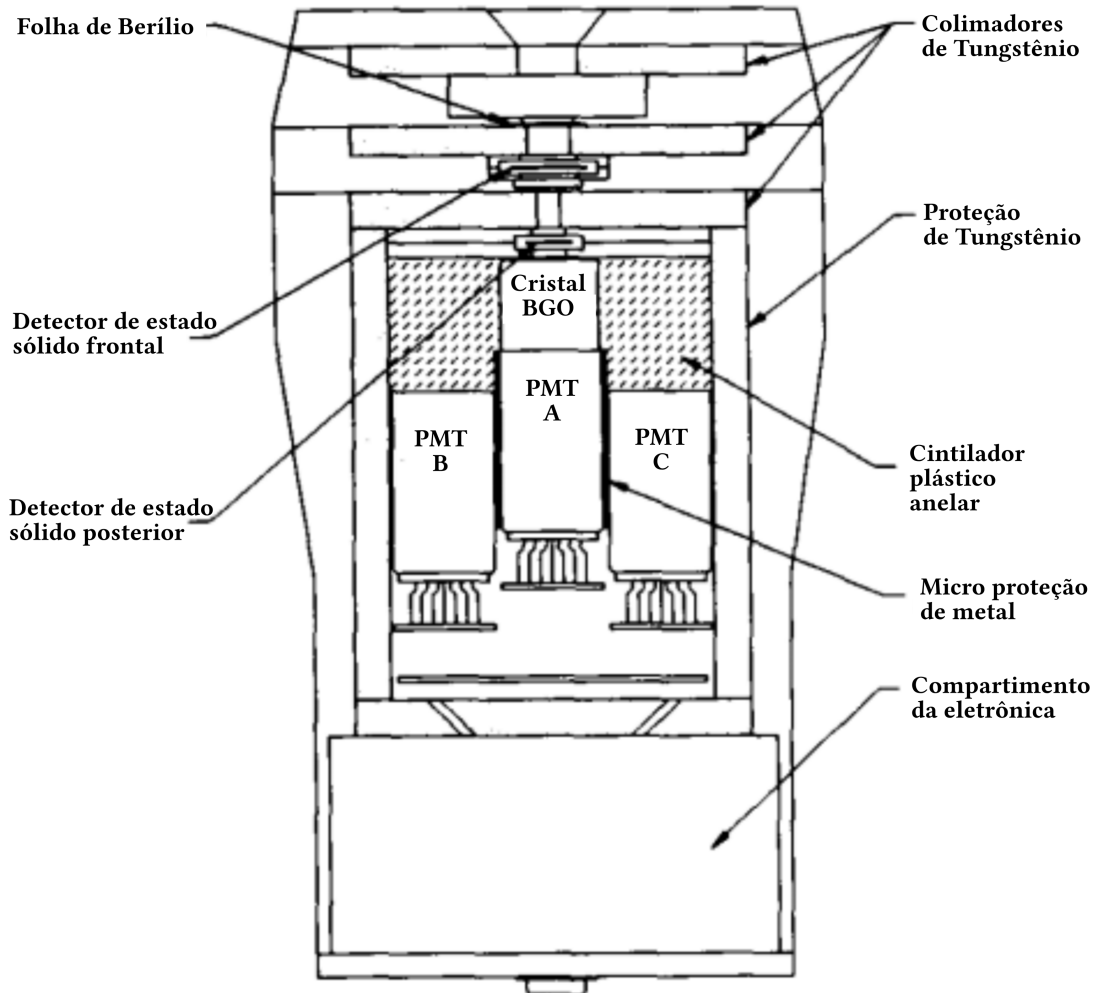
5.1.1 HEEF

O instrumento HEEF - High Energy Electrons Fluxometer (em português Fluxômetro de Elétrons de Alta Energia) foi desenvolvido para medir o fluxo de elétrons com energia na faixa de 1 a 10 MeV divididos em dez canais. Além disso, um canal extra é dedicado a medição integral de prótons de alta energia. O esquema do detector é uma versão aprimorada do SEE (do inglês, *Spectrometer for Energetic Electrons*), onde mecanismos de anti-coincidência são adicionados para melhorar a resolução. O

tipo de técnica chamadas de coincidência (eliminação de sinais que estimulem somente um dos detectores em sequência) e anticoincidência (eliminação de sinais que não estimulem simultaneamente detectores em sequência), permitem que a medição do instrumento não seja degradada por partículas fora do campo de visão (COOK et al., 1993). De forma clássica, o instrumento admite toda radiação que entra por uma abertura e atravessa um sistema de colimação. A medição de sua energia é realizada por dois detectores de estado sólido do tipo barreira de superfície, e um cintilador plástico de Germanato de Bismuto (BGO). Essa configuração também permite um método de tripla coincidência. Em adição, um escudo de cintilador envolve o BGO, também para anti-coincidência.

O sistema de colimação é composto por três discos de tungstênio que minimizam a geração de elétrons por *bremsstrahlung*. A abertura de entrada da radiação é definida pelo primeiro disco e possui 1,27 cm de diâmetro. O segundo disco tem abertura de 0,97 cm, e o terceiro 0,53 cm. Essas dimensões definem um meio ângulo de aquisição de 7.5° do centro do cristal de BGO, e 10° de suas extremidades. Assim tem-se um fator geométrico de $0.012\text{cm}^2 - \text{sr}$. Os dois detectores de silício, dispostos entre o segundo e terceiro discos, possuem 700 μm de espessura ambos, 100mm^2 de área o primeiro e 50mm^2 o segundo. Uma barreira de berílio (0,0024 cm de espessura) é posta entre o primeiro e segundo discos do colimador, para proteger os detectores de silício da radiação visível e barrar elétrons com energia inferior de 140 KeV. O cristal de BGO (2,54 cm de diâmetro e 2,0 cm de comprimento) é envolvido por um cintilador plástico em formato de anel, para medidas de anti-coincidência. Dois tubos fotomultiplicadores são responsáveis por coletar a luz desse cintilador. Uma característica relevante é que uma fonte fraca de radiação é embarcada na cabeça do instrumento para validação dos detectores em vôo. A [Figura 5.1](#) mostra o esquema de montagem do instrumento.

Figura 5.1 - Esquema da montagem do detector HEEF, com destaque a disposição dos detectores e características do colimador.



Fonte: Dichter et al. (1993).

O módulo eletrônico do HEEF deve lidar com quatro tipos diferentes de sinais elétricos dos detectores: dois de barreira de silício, do cristal BGO e do cintilador plástico de anti coincidência. Os sinais dos detectores de silício são enviados para analisadores de níveis que os classifica em três faixas: S0, S1 e S2. Se o nível lido estiver entre S0 e S1 ou S0 e S2 são gerados pulsos de 65 ns, W1 e W2 respectivamente, para verificação de coincidência. O sinal dos tubos fotomultiplicadores acoplados ao cristal BGO são convertidos em pulsos de tensão por um pré-amplificador de carga e são enviados para um analisador de altura de pulso. Este último, classifica o sinal em dez diferentes níveis de energia (L0-L1) até (L9-L10), e um canal integral >L10C,

Tabela 5.1 - Característica dos canais de detecção do HEEF.

Designação do Canal	Faixa de deposição de energia no BGO (MeV)		Faixa energia dos elétrons incidentes (MeV)
	Mínimo	Máximo	
LL-L1	0.44	0.96	1.0-1.5
L1-L2	0.96	1.46	1.5-2.0
L2-L3	1.46	1.96	2.0-2.5
L3-L4	1.96	2.45	2.5-3.0
L4-L5	2.45	2.95	3.0-3.5
L5-L6	2.95	3.44	3.5-4.0
L6-L7	3.44	4.43	4.0-5.0
L7-L8	4.43	5.42	5.0-6.0
L8-L9	5.42	7.41	6.0-8.0
L9-L10	7.41	9.40	8.0-10.0

Fonte: Adaptado de [Dichter et al. \(1993\)](#).

como mostrado na [Tabela 5.1](#). Somente os pulsos que permanecem nas janelas W1 ou W2, em ambos detectores de silício, são considerados na contagem.

É importante destacar que o instrumento demonstrou uma perda de eficiência de seu sistema de anti-coincidência devido diferenças na faixa de temperatura de operação projetada e a encontrada pela missão. Uma série de correções foram feitas e são descritas por [Dichter et al. \(1993\)](#).

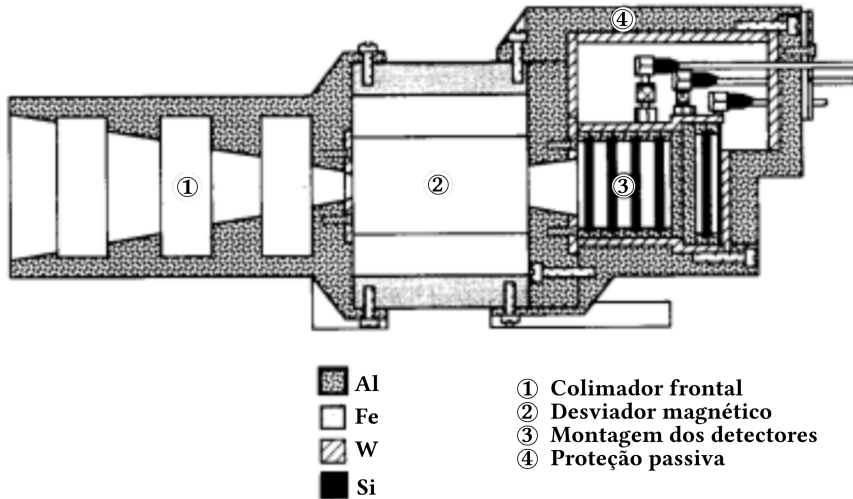
5.1.2 PROTEL

O instrumento PROTEL, [Figura 5.2](#) presente na missão CERRES, foi projetado para medir o fluxo de prótons de alta energia, na faixa de 1 a 100 MeV em 24 canais de energia em escala logarítmica. Ele é composto por dois detectores para duas faixas de energia distintas: o LEH – *Low Energy Head* (em português, detector de baixa energia) com 8 canais nas faixas de 1-9 MeV; e o HEH – *High Energy Head* (em português, detector de alta energia) 16 canais na faixa de 6-100 MeV. De modo geral, os dois detectores são semelhantes com alguns detalhes diferentes. Assim como outros sistemas clássicos, a admissão da radiação de medição é realizada por uma abertura de entrada seguida por um colimador, este pintado de preto para reduzir reflexos. Todo instrumento é protegido por uma camada de alumínio que evita a penetração de radiação fora do cone de entrada definido pelo colimador. Além disso,

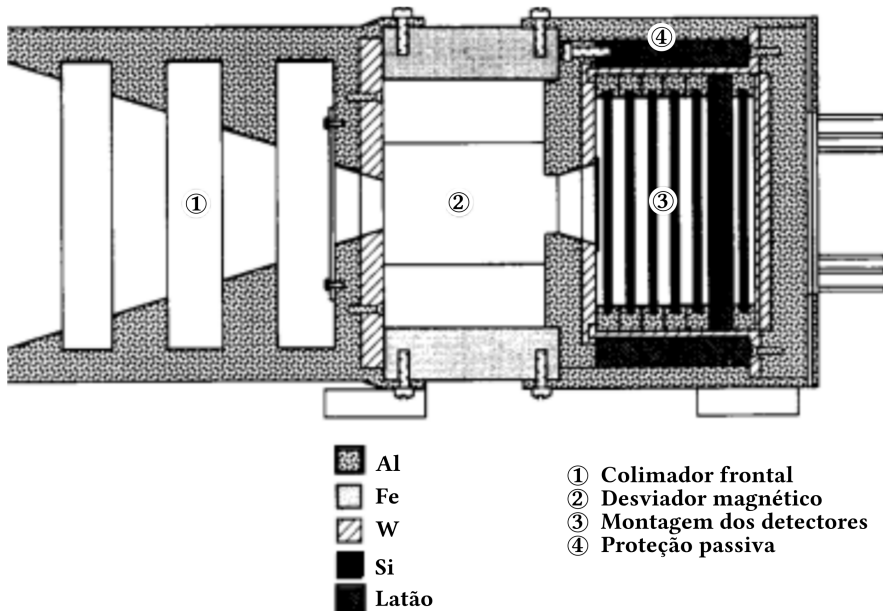
um ímã, entre o colimador e o elemento sensor, desvia os elétrons de entrada. O elemento sensor do LEH e HEH são compostos por pilhas de 5 e 6, respectivamente, sensores de silício do tipo barreira de superfície, para o LEH e o primeiro do HEH. Os cinco restantes do HEH são do tipo silício com Lítio desviado (*lithium drifted silicon*). A sequência de ativação dos detectores definem a energia depositada pela partícula. Em particular o último detector, tanto do LEH quanto HEH, atua como estimadores de anti-coincidência. Em cada um dos cinco primeiros sensores do HEH tem-se um anel externo também usado para anticoincidência. Esses anéis são parte do mesmo *wafer* de silício dos sensores, mas isolados eletricamente. Os pulsos obtidos dos sensores coincidentes com os dos anéis, são eliminados para reduzir contagens de fundo produzidas por partículas exteriores ao cone de entrada.

Figura 5.2 - Esquema da montagem do detector PROTEL, com maior destaque aos detectores e a colimação.

PROTEL - Cabeça de baixa energia
(1 - 9 MeV)



PROTEL - Cabeça de alta energia
(6 - 100 MeV)



Fonte: Violet et al. (1993).

A eletrônica dos detectores LEH e HEH também é semelhante a sistemas clássicos de detecção. Utiliza-se pré-amplificadores de carga para análise dos pulsos dos sensores de silício. Analisadores de pico de pulso associados a uma rede de comparadores e a lógica de coincidência e anti-coincidência, definem o canal de energia da partícula medida.

Figura 5.3 - Esquema eletrônico do detector PROTEL.

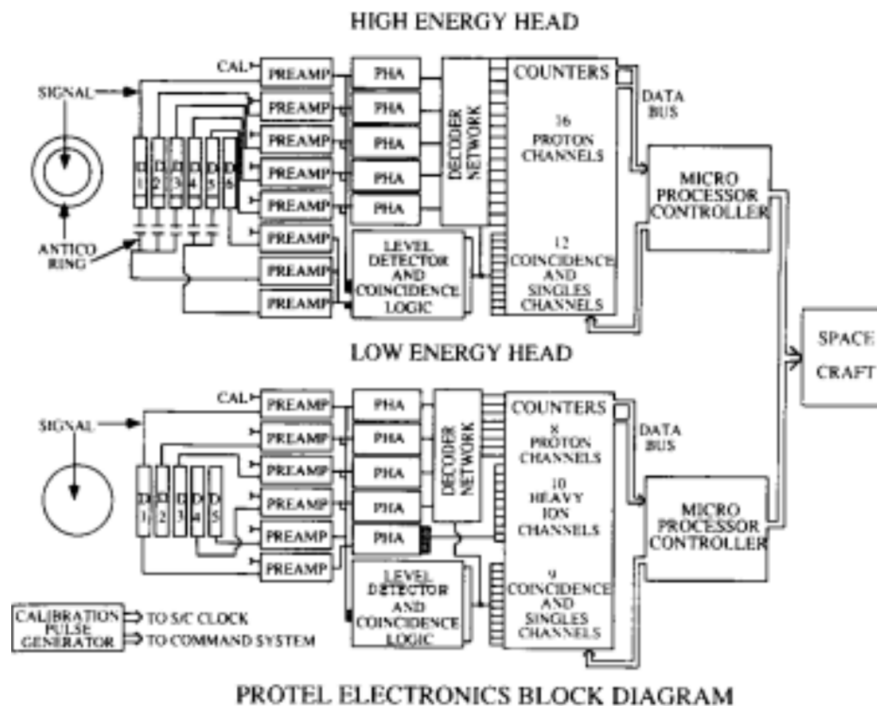


Fig. 3. PROTEL electronics block diagram.

Fonte: Violet et al. (1993).

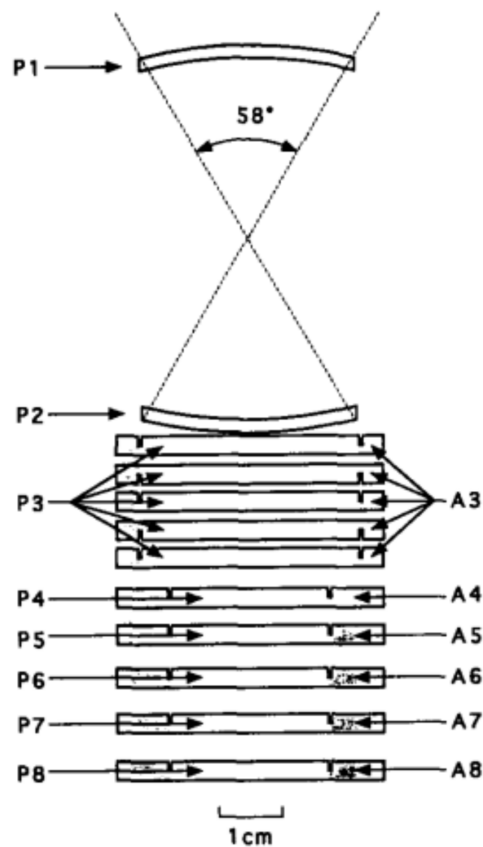
5.2 SAMPEX/PET

Em 3 de julho do ano de 1992 a agência espacial americana (NASA) lançou o satélite SAMPEX Explorador de Partículas Anômalas e da Magnetosfera (do inglês Solar, Anomalous, and Magnetospheric Particle Explorer). Essa missão teve como objetivo principal estudar as espécies de radiação presentes no espaço próximo da Terra. Entre as muitas contribuições dos instrumentos da SAMPEX está a coleta de dados de

um evento extremo do clima espacial, as tempestades geomagnéticas de outubro de 2003, onde observou-se a união das duas regiões do cinturão de radiação em uma única estrutura (FOX, 2012).

O instrumento PET, telescópio de partículas energéticas (do inglês, *Particle Energetic Telescope*), como o próprio nome sugere, foi o responsável por analisar as diversas partículas presentes na trajetória do satélite. O instrumento foi capaz de medir tanto partículas energéticas aprisionadas na magnetosfera quanto precipitadas em diferentes partes da órbita do SAMPEX (BAKER et al., 1993). O PET era composto por uma pilha de detectores de estado sólido com capacidade de identificar e medir a energia cinética de elétrons, entre 1 a 30 MeV, e isótopos de H e He na faixa de 20 a 80 MeV/nuc, além de fornecer a taxa de contagem de elétrons ($> 0,4$ MeV) e prótons (> 4 MeV) (COOK et al., 1993).

Figura 5.4 - Esquema de disposição dos detectores de estado sólido do instrumento PET.



Fonte: Cook et al. (1993).

A Figura 5.4 apresenta um esquema de como a unidade sensível a radiação foi construída. Trata-se de oito detectores de estado sólido dispostos em série (P1 a P8), composto por unidades em formato de disco feitas de silício com lítio deslocado (do inglês, *Li-drift silicon*). A interação da radiação com esses detectores produz pulsos de corrente de intensidade relativa a energia depositada em cada um. A deposição de energia no material depende do tipo de partícula e de sua energia. Ao analisar os padrões de intensidade da corrente em todos os detectores é possível estimar a energia e o tipo da partícula (COOK et al., 1993).

A radiação incidente, após atravessar um colimador (não mostrado na figura), atinge primeiramente o detector P1. Se o detector P2 também for sensibilizado significa que o ângulo de incidência da radiação está contido no campo de visão do instrumento, logo os sinais gerados nos detectores sensibilizados são analisados. Os detectores P3 a P5 são envoltos por um anel, do mesmo material que seu núcleo, que fazem um papel semelhante porém inverso. Caso algum desses anéis sejam sensibilizados, os sinais dos detectores são ignorados, isso indica que a radiação incidiu lateralmente ao instrumento.

De modo geral os sinais dos detectores são formatados por pré-amplificadores de carga, filtros ativos e alguns adquiridos por conversores ADC (Analogico/Digital) e outros com uso de discriminadores de nível. A análise de altura de pulsos, que determina a estimação da energia e tipo da radiação incidente, é realizada sempre que os sistemas de coincidência e anti-coincidência permitem. Em um evento válido, a saída dos ADC e os estados dos discriminadores são armazenados e separados para envio na telemetria (COOK et al., 1993).

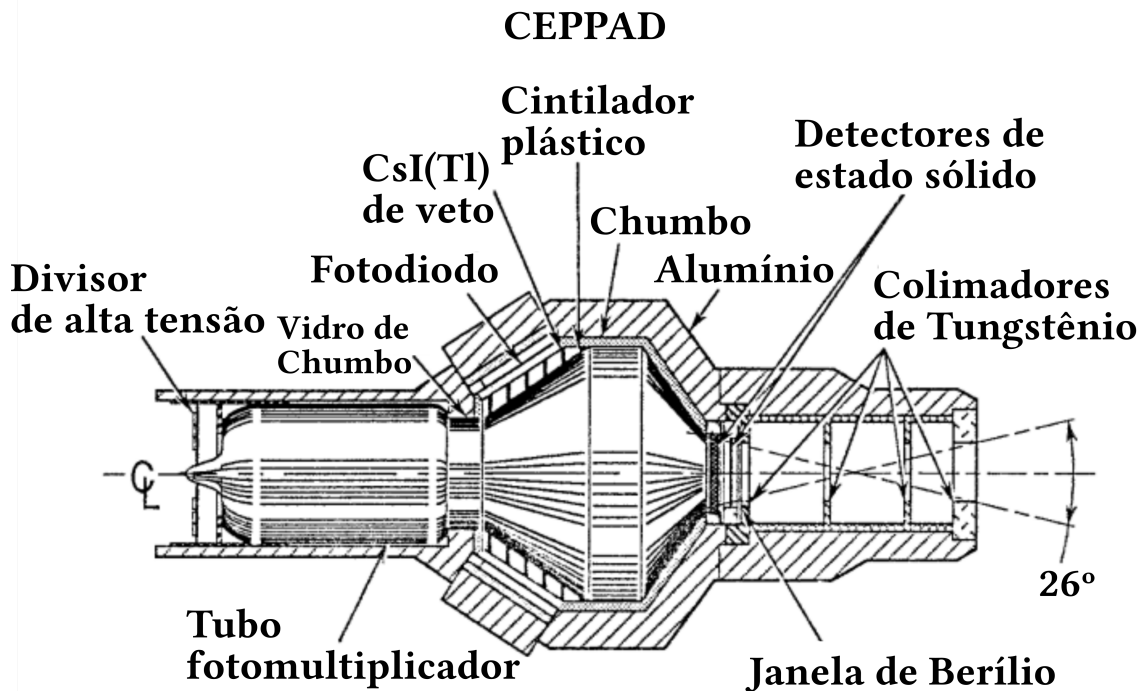
A massa total do instrumento PET é de cerca de 7.5 Kg, com um consumo de 1.2 W e taxa de dados média de 500 bps (COOK et al., 1993).

5.3 POLAR/HIST

A missão POLAR possui embarcado o experimento CEPPAD, desenvolvido para analisar de forma rápida, elétrons e íons energéticos em várias direções de observação. Entre os instrumentos do CEPPAD identifica-se o instrumento HIST (*High Sensitivity Telescope* - Telescópio de Alta Sensibilidade), Figura 5.5, dedicado a medição de elétrons na faixa de 0,350 KeV – 10 MeV e prótons entre 3,25 MeV – 80 MeV. A abertura de entrada do instrumento é localizada perpendicularmente ao eixo de rotação do satélite, o que torna possível cobrir um volume cilíndrico completo de observação. O colimador do detector é composto por discos de tungstênio,

no total de 4, e é projetado para proporcionar um campo de visão de 26° . Na extremidade oposta a abertura, no próprio colimador, antes de encontrar o elemento sensor, é posta uma janela de berílio para bloquear partículas com energias baixas. A unidade sensora é localizada depois dessa janela e é composta por três detectores. Detector A (e B) são do tipo barreira de silício com 300 μm (2000 μm) de espessura e 300mm^2 (200mm^2) de área. O detector C é um cintilador plástico de Bicron associado a um tubo fotomultiplicador da Hamamatsu R3668. Todo o instrumento HIST é envolto por uma casca de alumínio para proteção de radiação não compreendida pelo campo de visão. O cintilador plástico possui uma casca a mais de proteção composta de chumbo, e uma camada de cintilador de CsI(Tl) o envolve para que mesmo se alguma radiação penetrar, a blindagem possa ser removida do sinal por métodos de anti-coincidência. Um fotodiodo adquire o sinal luminoso desse cintilador. O sinal gerado pelos detectores, quando estimulados pela passagem de uma partícula, são somados, integrados e digitalizados em 8 bits. Partículas de diferentes energias e tipos produzem perfis distintos no sinal de cada detector. Simulações de Monte Carlo são usadas para identificar os perfis produzidos por cada partícula e energia. Uma complexa lógica entre os níveis do sinal de cada detector definem a faixa de energia e a identificação da partícula, usando 4 bits. Assim, a unidade de processamento recebe 12 bits que descrevem o evento e os sinais dos circuitos de anticoincidência. O HIST possui uma fonte de para o modo de calibração em vôo. O instrumento possui um total 18 diferentes modos de operação. (BLAKE et al., 1995)

Figura 5.5 - Esquema ilustrativo do detector HIST, a bordo do satélite POLAR. A coleta dos fótons de cintilação é feita por um tubo fotomultiplicador com proporções muito expressivas ao restante do instrumento.



Fonte: Blake et al. (1995).

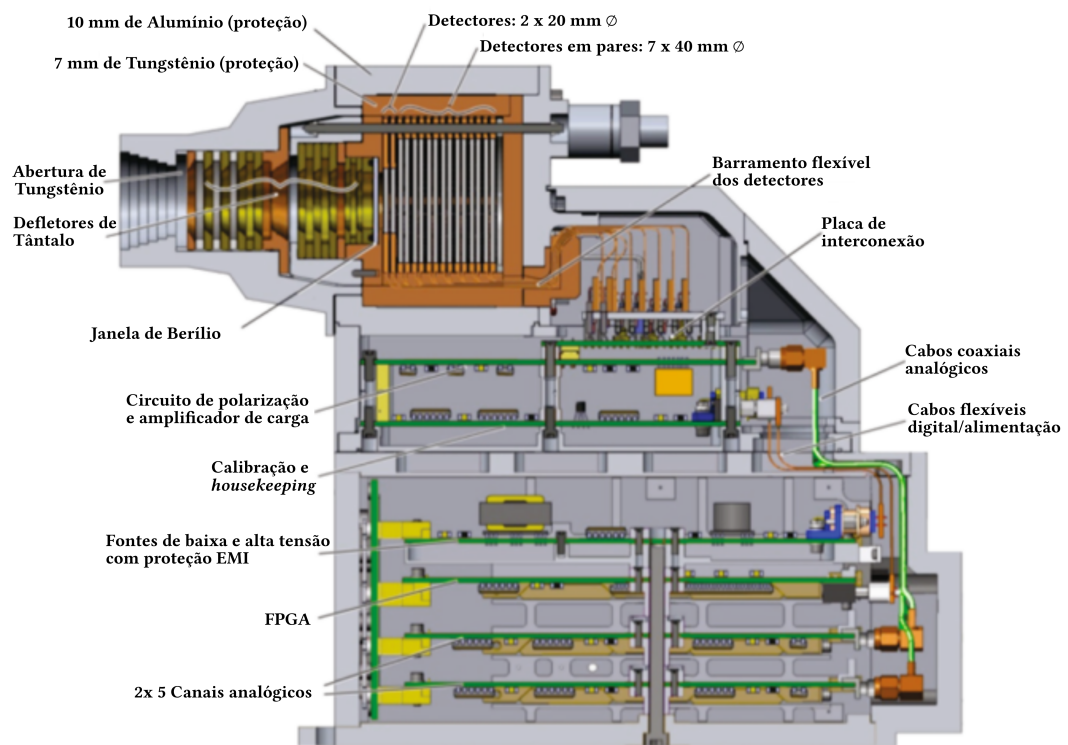
5.4 RBSP/REPT

A missão da NASA "Sondas de tempestades no Cinturão de Radiação" (do inglês, *Radiation Belt Storm Probes* - RBSP) foi lançada em agosto de 2012 para o estudo mais detalhado da dinâmica dos cinturões de radiação. A missão, ainda operante até então, é composta por dois satélites (RBSP A e RBSP B) com órbitas elípticas semelhantes e de baixa inclinação (10° com periastro cerca de 1.1 RE, e apoastro 5.8 RE). A pequena diferença entre as órbitas permite que uma das sondas complete um ciclo adiantada da outra num período de 2,5 meses. Desse modo, eventos de interesse podem ser estudados por efeitos simultâneos em diferentes porções do cinturão. O objetivo principal da missão é entender mais sobre os mecanismos que conduzem a repopulação e perda de partículas aprisionadas no cinturão, e como a corrente de anel interfere no comportamento do cinturão. Os instrumentos de

ambas sondas são os mesmos, e são capazes de medir partículas energéticas (elétrons, íons, e composição de íons), campos eletromagnéticos (E e B) e distribuição de ondas magnetohidrodinâmicas (dE and dB) (MAUK et al., 2013). O instrumento foco de análise nesta seção é o telescópio de elétron-próton relativísticos (do inglês *The Relativistic Electron-Proton Telescope - REPT*) responsável por detectar, como nome sugere, elétrons e prótons na faixa de energia de 1 a 20 MeV e 17 a 200 MeV, respectivamente.

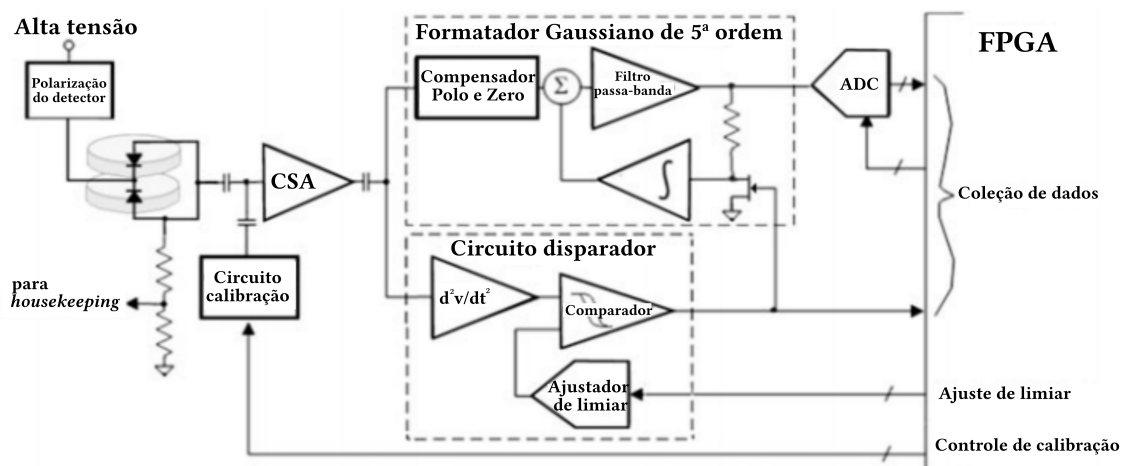
A tecnologia usada no REPT foi, em grande parte, resultado da experiência herdada com o instrumento PET a bordo do satélite SAMPEX. A Figura 5.6, mostra um esquema ilustrativo do instrumento REPT. Assim como outros instrumentos estudados, o REPT utiliza detectores de estado sólido a base de silício onde a estimativa de energia da partícula é feita com a altura dos pulsos de corrente e sua identificação pelo padrão de deposição de energia na pilha de detectores. O REPT foi construído com apontamento perpendicular ao eixo de rotação do satélite, o que torna possível medir o fluxo de partículas em todos *pitch angles* na maioria da orientação do campo magnético esperado. O colimador usado admite fluxo de partículas em um campo de visão de 32° com fator geométrico de $0,2\text{cm}^2$, além de filtrar partículas de baixa energia em sua abertura mais interna com o uso de uma janela de Berílio (Be - $1,5\text{mm}$ de espessura). São usados ao todo nove detectores de silício para a função de detecção da radiação. Os dois primeiros discos detectores de silício possuem diâmetro menor que os posteriores, técnica usada para reduzir a deposição parcial de energia por efeitos de espalhamento de radiação expressivos na interação com elétrons. Os detectores de índice 3 a 7 são construídos em pares. A eletrônica de aquisição é também muito semelhante ao PET, com uso de pré-amplificadores de carga, filtros ativos, conversores A/D e discriminadores. Assim como em todo instrumento baseado em detectores de silício, é necessário uma fonte de alta tensão. No REPT usou-se o máximo de 70 V para polarizar os detectores. A Figura 5.6 mostra um esquema da disposição dos elementos do instrumento, com destaque nos discos de silício e na eletrônica. Na Figura 5.7 é apresentado o esquema funcional de seus componentes de detecção.

Figura 5.6 - Esquema ilustrativo do detector REPT, a bordo do satélite RBSP.



Fonte: Baker et al. (2013).

Figura 5.7 - Esquema funcional dos subsistemas de detecção no instrumento REPT. É mostrado com mais detalhes os sistemas eletrônicos necessários para o funcionamento do instrumento.



Fonte: Baker et al. (2013).

5.5 CSSWE/REPTile

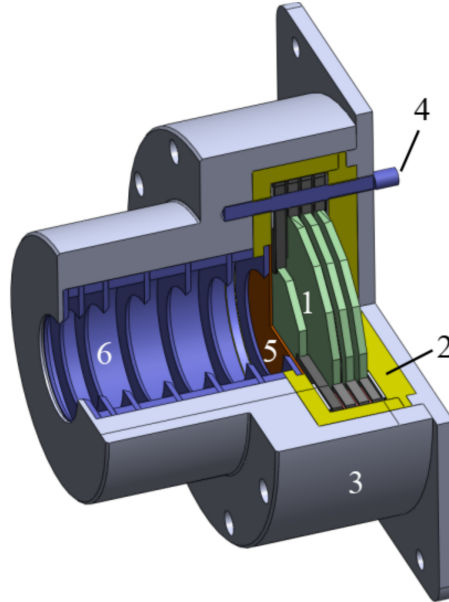
Um expressivo exemplo de demonstração das possibilidades da tecnologia de CubeSat no desenvolvimento de missões científicas é o experimento de clima espacial de acrônimo CSSWE (do inglês, *Colorado Student Space Weather Experiment*). Esse CubeSat foi desenvolvido por uma equipe multidisciplinar de cerca de 60 alunos da Universidade de Colorado (*University of Colorado*), com objetivo principal estudar o clima espacial na magnetosfera terrestre. Lançado em 13 de Setembro de 2012 em uma órbita baixa (478 Km periastro, 786 Km apoastro e 64,7° de inclinação), o CubeSat contava com um detector, chamado REPTile, capaz de medir prótons de 9 a 40 MeV e elétrons de 0,58 a >3,8 MeV (SCHILLER et al., 2014). O desenho de tal instrumento foi idealizado como uma miniaturização do REPT, a bordo das sondas RBSP. A missão forneceu importantes dados científicos por mais de 300 dias, compilados e fornecidos em modo aberto em (LI, 2014).

Assim como no instrumento REPT, o REPTile é baseado em detectores de estado sólido de silício dopado, em formato de disco dispostos em pilha. Como mostrado na Figura 5.8, um colimador restringe o ângulo de visão a 53°, formado por sete discos de tântalo ($Z = 73$, Ta) vazadas com centro vazado e bordas internas afiadas de modo a reduzir espalhamentos das partículas incidentes. Após a colimação tem-se uma janela de berílio (Be) para filtrar partículas de baixa energia e reduzir ruídos nos 4 detectores de silício seguintes. O sinal dos detectores é adquirido por amplificadores de carga seguido de amplificadores lineares. Não existe componente conversor analógico digital, em vez disso são usados discriminadores de sinal que identificam o nível do mesmo em quatro canais. Desse modo a energia da partícula incidente é também classificada em quatro faixas. Na operação do instrumento em órbita foi constatado a falha em um dos detectores. Através de simulações em terra, pode-se recalibrar o instrumento entretanto com eliminação de uma faixa de energia, Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Tabela com as faixas de energia de resposta do instrumento REPTile depois de recalibração dado o mal funcionamento de um detector.

Espécie	Canal 1 (MeV)	Canal 2 (MeV)	Canal 3 (MeV)
e ⁻ (elétron)	0,58-1,63	0,63-3,8	>3,8
H ⁺ (proton)	9-8	18-30	30-40

Figura 5.8 - Esquema ilustrativo do instrumento REPTile. (1) Discos detectores de silício; (2) escudo de Tântalo; (3) escudo de Alumínio; (4) pino guia para alinhamento; (5) janela de Berílio; (6) colimadores de Tântalo.



Fonte: Schiller et al. (2014).

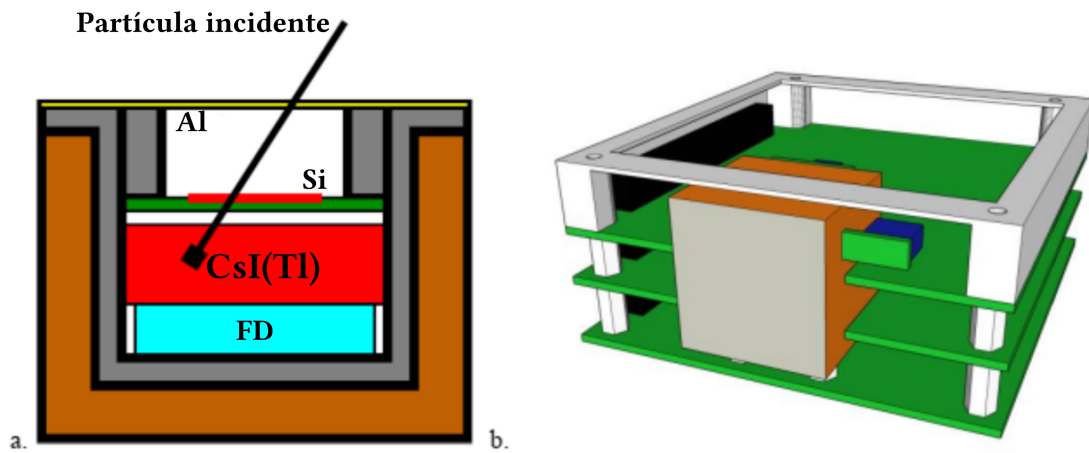
5.6 Aalto-1/RADMON

Outro CubeSat desenvolvido em sua maioria por estudantes e que cujo um dos objetivos é o estudo da radiação próximas a Terra, é o Aalto-1. O dispositivo em formado de 3U com 4kg, foi lançado em Junho de 2017 numa órbita baixa (LEO) e até cinco meses após mantinha operações normais (PRAKS et al., 2017). O CubeSat foi desenvolvido com propósito principal de provar as capacidades das tecnologias de três cargas úteis no ambiente espacial, sendo uma delas o instrumento monitor de radiação RADMON (do inglês *Radiation Monitor*) sensível a prótons na faixa de 10 a 200 MeV e elétrons de 0,7 a 10 MeV.

O instrumento RADMON possui dois tipos de detectores de estado sólido distintos, um principal baseado em cintilador de Iodeto de Césio ativa com Tálcio (CsI(Tl)) associado a um fotodiodo, onde quase toda energia da partícula incidente é depositada, e um fino detector a base de silício o qual é usado para contagem e coincidência dos sinais (PELTONEN et al., 2014). Ambos pulsos são coletados e digitalizados para análise em um FPGA. Somente são considerados pulsos coincidentes nos dois detec-

tores. Uma fina camada de alumínio é posta na estrada do instrumento para barrar partículas de baixa energia. A figura [Figura 5.9](#) mostra alguns detalhes da montagem do instrumento.

Figura 5.9 - Esquema ilustrativo do instrumento RADMON. (a) Em amarelo a folha de Alumínio para filtrar partículas de baixa energia, seguido de uma folha de Silício (em vermelho), o cintilador de CsI (vermelho) e em ciano o fotodiodo. (b) Renderização de uma visão externa do instrumento.



Fonte: Kestilä et al. (2013).

6 DESENVOLVIMENTO

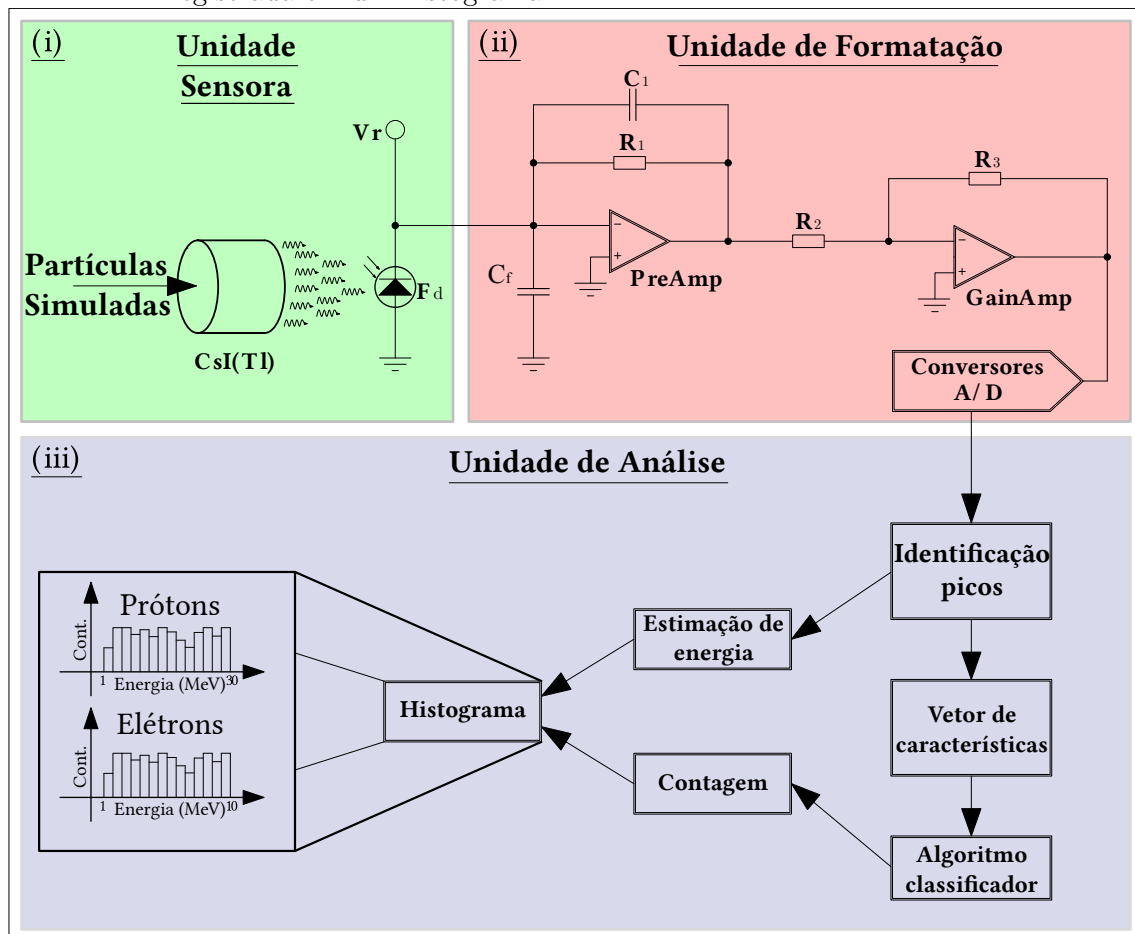
A tecnologias estudadas no capítulo anterior sugerem certos subsistemas essenciais em instrumentos detecção de radiação de alta energia no ambiente espacial. De modo geral observa-se que os componentes analisados podem ser agrupados em quatro unidades: (i) unidade sensora, responsável por converter a radiação a ser medida em uma grandeza elétrica; (ii) unidade de formatação, com a função de adequar o sinal a níveis coerentes de leitura; (iii) unidade de análise, responsável por interpretar o sinal resultante; (iv) colimação e proteção. Identificou-se vantagens e desvantagens dos métodos e técnicas usados pelos casos estudados na composição de tais unidades. Com isso, propõe-se de forma conceitual, uma solução para cada uma. Os detalhes são descritos no que segue.

Tendo em vista a aplicação do sensor proposto, um detector de partículas para operar em regiões similares às compreendidas pelo Cinturões de Radiação da Terra, a solução tecnológica é desenvolvida com foco na redução de custos, tamanho e complexidade do sistema de detecção, a fim de aprimorar a viabilidade de tais missões em plataformas de baixo custo, como os CubeSats. Foram desenvolvidos modelos virtuais das unidades essenciais que além de permitir estimar alguns parâmetros construtivos e operacionais foram úteis para validação inicial da solução proposta. As unidades (i) a (iii) foram modeladas em conjunto, dado o nível elevado de conectividade entre seus componentes. A unidade de colimação e proteção foi desenvolvida de forma separada em outro ambiente de modelagem, para destacar parâmetros dimensionais, de massa, e disposição dos componente.

O cintilador de cristal CsI (Tl) foi escolhido como o elemento principal para a unidade de detecção (i). Este componente permite que as unidades (iii) e (iv) posteriores sejam mais compactas. A unidade de análise, em especial, foi projetada com um novo algoritmo simplificado para interpretação de sinais, que é proposto e avaliado neste trabalho. A metodologia de validação é feita pelo desenvolvimento de modelos virtuais (MV) de cada unidade, seguida de simulação de suas interações coletivas a estímulos de entrada pré-estabelecidos. A MV da unidade (ii) é modelada para fornecer o sinal luminoso do cintilador para um dado estímulo de partícula, parametrizada quanto ao seu tipo (elétron, próton ou alfa), energia e tempo que ocorre a colisão no detector. Os parâmetros do modelo utilizados nas simulações da unidade de detecção, são definidos pela extrapolação de valores experimentais da resposta do cintilador a interação de diferentes partículas, esses valores são obtidos a partir da literatura. O MV da unidade (iii) é feito com descrições matemáticas usuais

de seus componentes eletrônicos (amplificadores, resistores, etc..). Para a unidade (iv), são feitos algoritmos baseados em linguagem C++ para ler e interpretar os sinais digitalizados. Finalmente, a eficiência do sistema do MV proposto é obtida comparando a saída da unidade (iv) e o estímulo de entrada. Os resultados destas comparações são apresentados por um histograma de contagens de partículas por energia para cada espécie e para diferentes intervalos de tempos de incidência de partículas subsequentes na superfície do detector. A **Figura 6.1** mostra em resumo a topologia das unidades sensora (i), unidade de formatação (ii) e unidade de análise (iii).

Figura 6.1 - Esquema ilustrativo das unidades propostas para construção do modelo funcional do detector. (i) O cintilador de cristal CsI(Tl) recebe a partícula atingida e produz fótons que atinge o fotodiodo. (ii) O sinal de corrente do fotodiodo é integrado pelo *PreAmp*, amplificado pelo *GainAmp* e o conversor "A/D" digitaliza o sinal. (iii) A unidade de análise de sinal é feita totalmente digital, com um PHA para estimar a energia da partícula, PSA para determinação da espécie. A estimativa de energia e contagem de elétrons e prótons é registrada em um histograma.



6.1 Unidade Sensora

Quando partículas carregadas atravessam a matéria, elas dissipam energia na ionização e excitação das moléculas constituintes do material de incidência. Esse mecanismo é a base de muitos instrumentos utilizados para detecção e medição de tais partículas (BIRKS, 1964). A topologia de detecção proposta neste trabalho consiste em uma unidade sensora baseada em um cintilador de CSI(Tl) associado com um fotodiodo. Resumidamente, as partículas com energias relativísticas, aprisionadas no cinturão de radiação, ao atingir o cristal perdem energia em sua trajetória no interior do material criando regiões de estados excitados. A carga gerada se dissipa por todo corpo do cristal atingindo níveis de energia menores e emitindo luz nesse processo. O sinal óptico gerado é capturado pelo fotodiodo o qual o converte em um pulso de corrente elétrica (KILGUS et al., 1990; MEIJER et al., 1987; SUFFERT, 1992; KREUTZ et al., 1987). A principal vantagem do uso desse cristal está na possibilidade de distinguir partículas de diferentes espécies pela análise de sua resposta luminosa (KESZTHELYI-LÁNDORI; HREHUSS, 1969; HORN et al., 1992; WAGNER et al., 2001; WOMACK et al., 1964). O cristal apresenta boas características mecânicas que facilita seu "desenho" em diferentes formas, dimensões e o torna capaz de ser embarcado em uma missão espacial, como o exemplo dos instrumentos HEEF da missão CRRES e RADMON do CubeSat Aalto-1. Essa solução é de custo menor comparado ao uso de detectores de silício de grande volume e alta pureza. Devida a elevada resposta luminosa do cintilador de CSI(Tl) (LEMPICKI et al., 1993), e o espectro de emissão localizado fortemente na região visível, o torna extremamente compatível com fotodiodos comerciais. Com a adição de um pré-amplificador de carga, um amplificador linear, um conversor analógico/ digital e o uso de técnicas digitais de análise de pulso, é possível reduzir consideravelmente a quantidade de componentes eletrônicos necessários para interpretar os sinais gerados pelo detector.

6.1.1 Cintilador de CsI(Tl)

O processo de cintilação em cristais cintiladores inorgânicos devido a radiação ionizante pode ser simplificado em três subprocessos: (i) absorção e multiplicação; (ii) migração dos portadores de carga; (iii) relaxamento e emissão. Primeiramente, a partícula incidente deposita a sua energia no cristal na forma de criação de portadores de carga primários (lacunas e elétrons - subprocesso i) que passam por sucessivos decaimentos radioativos (raios X secundários, Auger e espalhamento inelástico elétron/elétrons). Quando a energia dos elétrons e lacunas é menor que o limite de ionização, eles permanecem no topo da camada de valência, portanto com certa

movibilidade entre a matriz do cristal. Nessa movimentação os portadores de carga podem encontrar áreas onde o nível de energia na camada de valência é menor (subprocesso ii), na vizinhança de um elemento dopante (como o Tálcio) ou em defeitos na matriz, por exemplo. Nesse momento, o estágio final se inicia (subprocesso iii), a acomodação dos portadores de carga seguida da emissão de fótons (BIZARRI, 2010).

A eficiência do fenômeno de cintilação depende da composição do material cintilador e do poder de ionização da partícula incidente (dE/dx) (BIRKS, 1964). Para a construção do MV, definiu-se $N(t)$ como a produção de fótons no tempo. No geral, a resposta luminosa $N(t)$ do CsI(Tl) pode ser descrita como a soma de duas funções de decaimento temporal (Equação 6.1), sendo uma com decaimento rápido e a outra lento, com parâmetros sensíveis ao poder de ionização da partícula (como mostrado nos trabalhos de (KESZTHELYI-LÁNDORI; HREHUSS, 1969; WOMACK et al., 1964; STOREY et al., 1958; BENRACHI et al., 1989; ALARJA et al., 1986)) dado por,

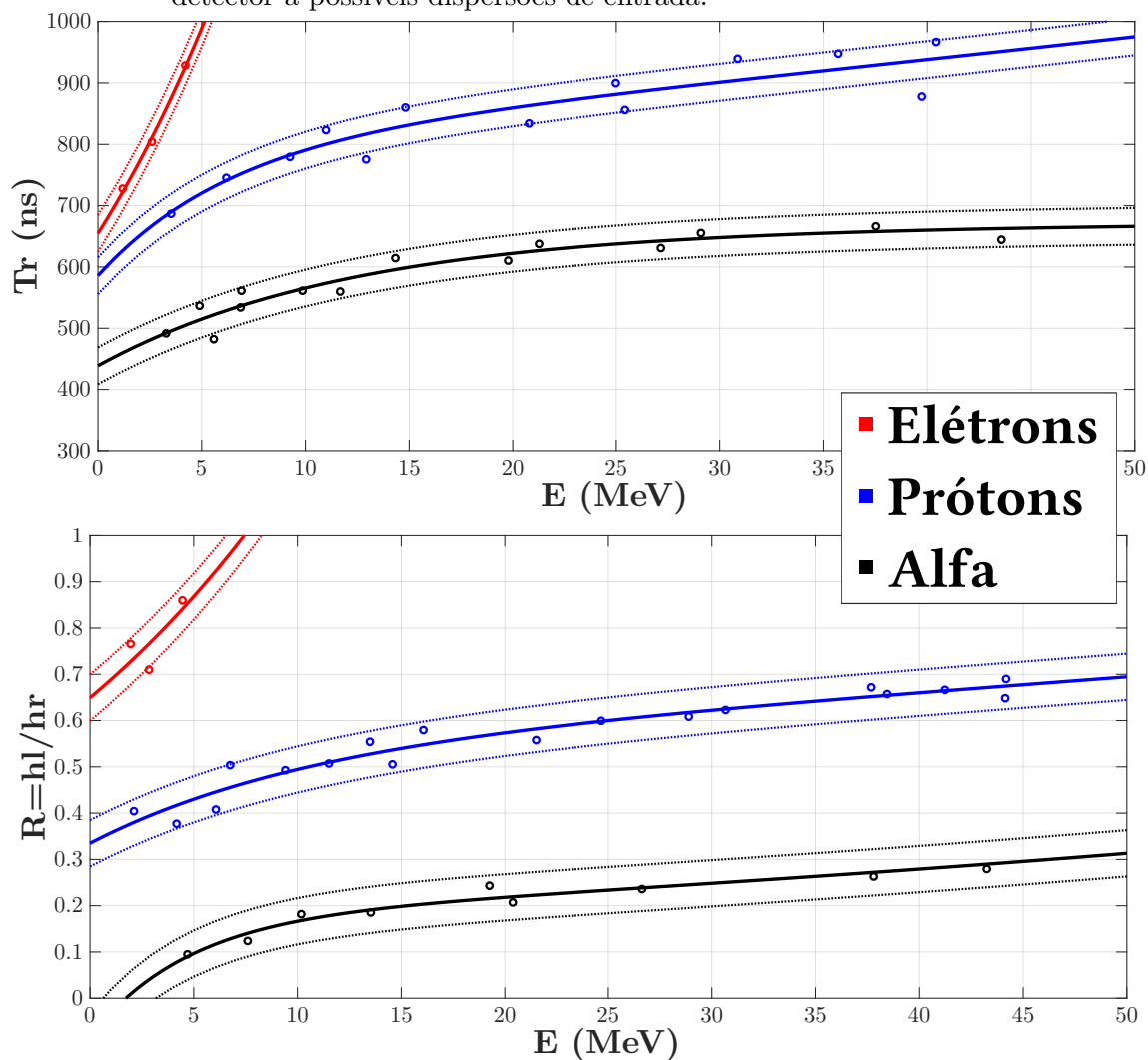
$$N(t) = \frac{h_l}{\tau_l} \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_l}\right) + \frac{h_r}{\tau_r} \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau_r}\right) \quad (6.1)$$

nos quais h_l, τ_l representam a intensidade e a constante de decaimento da componente lenta, respectivamente, e h_r, τ_r relacionados a componente rápida.

De modo a simular a resposta luminosa no tempo do CsI(Tl) estimulado por diferentes espécies de partícula e energia, considerou-se os dados apresentados por Benrachi et al. (1989) para estabelecer uma função de estimação das variáveis $t_r(E)$ e $R(E) = h_l/h_r(E)$, para prótons e elétrons, quanto a sua energia (1 MeV e 50 MeV). Adicionalmente, o mesmo foi feito para o caso de partículas alfa (íons de Hélio), a fim de simular a radiação de fundo. Adotou-se um valor de 4 μ s para a constante de decaimento lento, já que a mesma não apresenta variação expressiva quanto ao poder de ionização da partícula incidente.

Os dados experimentais relacionados a interação do CsI(Tl) com elétrons foram usados no ajuste de uma função exponencial de primeira ordem. Já para prótons e alfa foi necessário uma função exponencial de segunda ordem para minimizar erros. Nas curvas das funções ajustadas mostrados na Figura 6.2 definiu-se um intervalo superior e inferior para preservar uma certa variabilidade dos dados quando extração for usada. Este intervalo de tolerância foi escolhido para conter todos os dados experimentais obtidos no trabalho em questão, e evitar pontos de regiões de coincidência entre as partículas, principalmente no intervalo de 1 MeV a 5 MeV.

Figura 6.2 - Dados das componentes da Equação 6.1 que descrevem a luminescência do cintilador CsI(Tl)(Equation 6.1) adaptado de (BENRACHI et al., 1989). (a) Variação do tempo de decaimento rápido t_f e (b) a razão de intensidade h_s/h_f vs energia de partículas diferentes. As linhas contínuas representam a função de ajuste desenvolvida com pontos de dados experimentais de (BENRACHI et al., 1989). Essas funções são usadas para construir os sinais do cintilador de luminescência no modelo do detector proposto. Uma pequena margem da função de ajuste é considerado (linhas de traço) para avaliar a resposta do detector a possíveis dispersões de entrada.



A intensidade luminosa relativa (h_l e h_r), associada com a componente lenta e a rápida, pode ser calculada do valor total de luminosidade produzida pelo cristal em função da energia da partícula ($L(E) = h_l + h_r$). De modo a simplificar o modelo, adotou-se o valor de luminescência por energia segundo a folha de dados (*datasheet*) de um cristal de CsI(Tl) fornecido pelo fabricante, dado por $L(E) = 54000 \text{ fotons/MeV}$ (SAINT-GOBAIN CRYSTALS, 2017).

6.1.2 Fotodiodo

As vantagens de usar fotodiodos (FD) para detecção de cintilação são conhecidas há décadas (FAN, 1964). Essa solução permite redução de peso, volume, potência elétrica, e ruído, comparado aos antigos fotomultiplicadores. Característica conveniente para aplicações espaciais. O mecanismo básico que guia a conversão de fótons da cintilação em um pulso de corrente é o transporte de elétrons da banda de valência para a banda de condução. Em energias menores que a lacuna de banda (*band gap* 1,12 eV), fótons incididos no FD, podem ser absorvidos somente por elétrons livres com baixo coeficiente de absorção. Em energias maiores que 1,2 eV, os fótons são absorvidos e podem deslocar elétrons da banda de valência para a banda de condução. Entretanto, com o aumento da energia, os fótons podem atravessar o material sem transferir sua energia (RENKER; LORENZ, 2009). Desse modo os fotodiodos são operacionais em uma particular faixa de comprimento de onda, definidos pelas características do material e sua construção. Os pulsos de corrente elétrica são rápidos, uma vez que os portadores de carga são acelerados por um campo elétrico intrínseco do material, vindo da junção semicondutora com diferentes dopagens. A área de desempenho do campo elétrico é limitada à região de depleção. Por isso, é comum que a polarização reversa do fotodiodo aumente esta zona, permitindo assim a aceleração de mais portadores de carga e, conseqüentemente, amplificação do pulso de corrente.

Defini-se tempo de coleta como a unidade temporal necessária para que a radiação produza um efeito desejável num material detector. No caso do cintilador é o tempo de emissão de fótons dado a interação com a radiação ionizante. No fotodiodo seria o tempo entre a incidência dos fótons de cintilação e a geração de corrente no FD. Desde que o tempo de coleta do FD seja menor que do cintilador, pode-se considerar que o formato do sinal de corrente tenha o mesmo comportamento da luminosidade emitida pelo CsI(Tl) (VALENTINE et al., 1991).

Na unidade sensora proposta os fótons de cintilação emitidos pelo CsI(Tl) atingem o FD e conduz a geração de elétrons-lacunas no mesmo. A eficiência de tais interações é grandemente determinada pela ótica de acoplamento de tais componentes, assim a eficiência quântica (Q) é definida pela correlação entre o espectro de emissão (do cristal) e sensível (do FD). A Equação 6.2 fornece uma descrição matemática da quantidade de elétron-lacunas criados no FD (N_{eh}) (VALENTINE et al., 1991), considerando que os fótons entregam toda sua energia no tempo $t=0$,

$$N_{eh}(E, T) = \int_0^\infty \int_0^\infty N(E, \lambda, T, t) \eta(\lambda, T, t) Q(\lambda, T, t) d\lambda dt \quad (6.2)$$

no qual, N é o número de fótons de cintilação, η a eficiência de coleta e Q a eficiência quântica, expressa em função do comprimento de onda (λ), temperatura (T) e tempo (t). De modo a simplificar a [Equação 6.2](#) para o propósito deste trabalho, considerou-se a temperatura constante em $25^\circ C$. O pulso de corrente elétrica observada no FD (I_{PD}) é descrito pela aceleração das cargas criadas, elétrons-lacunas, no material dado por:

$$I_{PD}(E, t) = \frac{dQ}{dt} = \frac{dN_{eh}(E, t)}{dt} \cdot e \quad (6.3)$$

de modo que e é a carga do elétron. O total de fótons produzidos em função do comprimento de onda e temperatura, por unidade de energia depositada no tempo, é dado por

$$N(E, \lambda, t) = E \cdot N(t) \cdot \epsilon(\lambda) \quad (6.4)$$

em que $\epsilon(\lambda)$ é o espectro de emissão do Csi(Tl). Assim, ao derivar a [Equação 6.2](#), tem-se que

$$\frac{dN_{eh}(E, t)}{dt} = E \cdot N(t) \cdot \eta \cdot \int_0^\infty \epsilon(\lambda) Q(\lambda, t) d\lambda \quad (6.5)$$

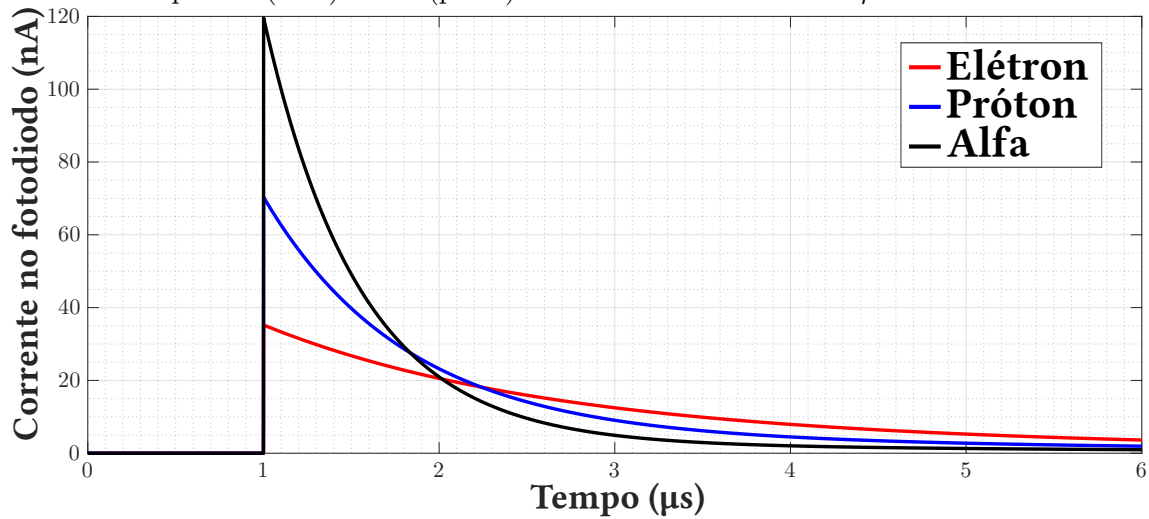
com referência ao trabalho [Valentine et al. \(1991\)](#), considerou-se a eficiência de coleta constante em relação a temperatura, tempo e espectro, com valor de 81% ($\eta = 0.81$). Adicionalmente a eficiência quântica média também foi considerada com valor constante de 91% em uma temperatura de $25^\circ C$, definido por

$$\bar{Q}(25^\circ C) = \int_0^\infty \epsilon(\lambda) Q(\lambda) d\lambda \quad (6.6)$$

Ao substituir a [6.5](#) na [6.3](#), tem-se que:

$$I_{PD}(E, t) = E \cdot N(t) \cdot \eta \cdot \bar{Q} \cdot e \quad (6.7)$$

Figura 6.3 - Corrente de saída do modelo de fotodiodo como resposta a simulação de luminescência do cintilador produzido pela interação de um elétron (vermelho), próton (azul) e alfa (preto) com 15 MeV no instante $1\mu s$.



Por fim, as dimensões espaciais dos componentes foram determinadas também conforme a referência [Valentine et al. \(1991\)](#). O cristal cintilador tem formato cilíndrico de 1x1 cm. O FD igualmente, tem mesma área sensível (1x1cm) contudo considerou-se o modelo da *Hamamatsu* s3590-08, uma atualização do modelo s3590-03 usado por ([VALENTINE et al., 1991](#)). A grande vantagem desse modelo é a reduzida tensão reversa necessária, cerca de 50V ([MOSZYNSKI et al., 1997](#)) já é alcançada toda região de depleção. A [Figura 6.3](#) apresenta uma simulação da corrente no fotodiodo para três eventos distintos no cintilador: atingido por uma elétron; próton; e partícula alfa. Todos com energia de 15 MeV.

6.2 Unidade de Formatação

A corrente do fotodiodo se comporta semelhante a luz emitida pelo cristal na ocorrência de um evento de ionização. Sabe-se também que a quantidade total de luz é proporcional a energia da partícula incidente que provocou a ionização. Desse modo, ao integrar o sinal de corrente gerado é possível obter o total de energia dissipado no cintilador. De forma geral, usa-se para executar tal função um pré-amplificador de carga, componente eletrônico ativo que produz uma resposta em tensão similar a operação de integração de seu sinal de entrada, no caso, a carga total gerado no fotodiodo (corrente)([KNOLL, 2010](#)). O termo "similar" é usado pois a operação matemática de integração realizada por esse componente é definida com um certo atraso em sua resposta dado pelo parâmetro de constante de tempo do amplificador, definida pelo valores de resistência e capacitância de retro-alimentação (RC), assim

como apresentado no [Capítulo 3](#). No modelo da unidade de formatação, o sinal do fotodiodo (I_{PD}) é a entrada para um amplificador de carga (*PreAmp*), que converte o pulso de corrente de micro segundos para um pulso de tensão de dezenas de micro segundos. Definiu-se uma constante de tempo de valor igual a $0.5\mu s$, com o resistor de $R_1 = 0.5M\Omega$ e capacitor de $C_1 = 1pF$.

O tempo de decaimento da intensidade luminosa no cintilador é considerado alto, na ordem de $6\mu s$ todo o sinal. Se a constante de tempo do amplificador de carga não for suficientemente maior que esse valor, erros de deficiências balísticas (*ballistic deficit*) podem ocorrer alterando a tensão de pico. A influência desse efeito dificulta a calibração entre a tensão de pico e o valor de carga real. Assim, é necessário que o pré-amplificador tenha um tempo de formatação elevado, o que torna o sistema de detecção lento. Em ([VALENTINE et al., 1991](#)), é proposto um método de calibração que permite menores tempos de formatação. Neste método, um pulso artificial é introduzido no amplificador de carga, similar ao sinal do cintilador para calibrar o instrumento com valores de carga pré-definidos. O autor demonstra a correta estimativa da carga produzida no fotodiodo para diferentes constantes de tempo de formatação com um valor mínimo de $5\mu s$, o qual é adotado neste trabalho.

O sinal de tensão relacionado com a detecção da radiação ionizante, sendo a saída do pré-amplificador de carga (*PreAmp*), é submetido a um certo ganho com uso de outro amplificador na configuração clássica linear. Essa etapa é necessária para adequar o nível de sinal a conversão analógico-digital seguinte. O ganho, com valor cerca de 130 ($R_2 = 1.3M\Omega$ and $R_3 = 100K\Omega$), é definido de forma que as partículas mais energéticas esperadas não promovam tensões maiores que o nível de 5V, e que as partículas menos energéticas esperadas sejam observáveis dada a resolução do conversor analógico-digital.

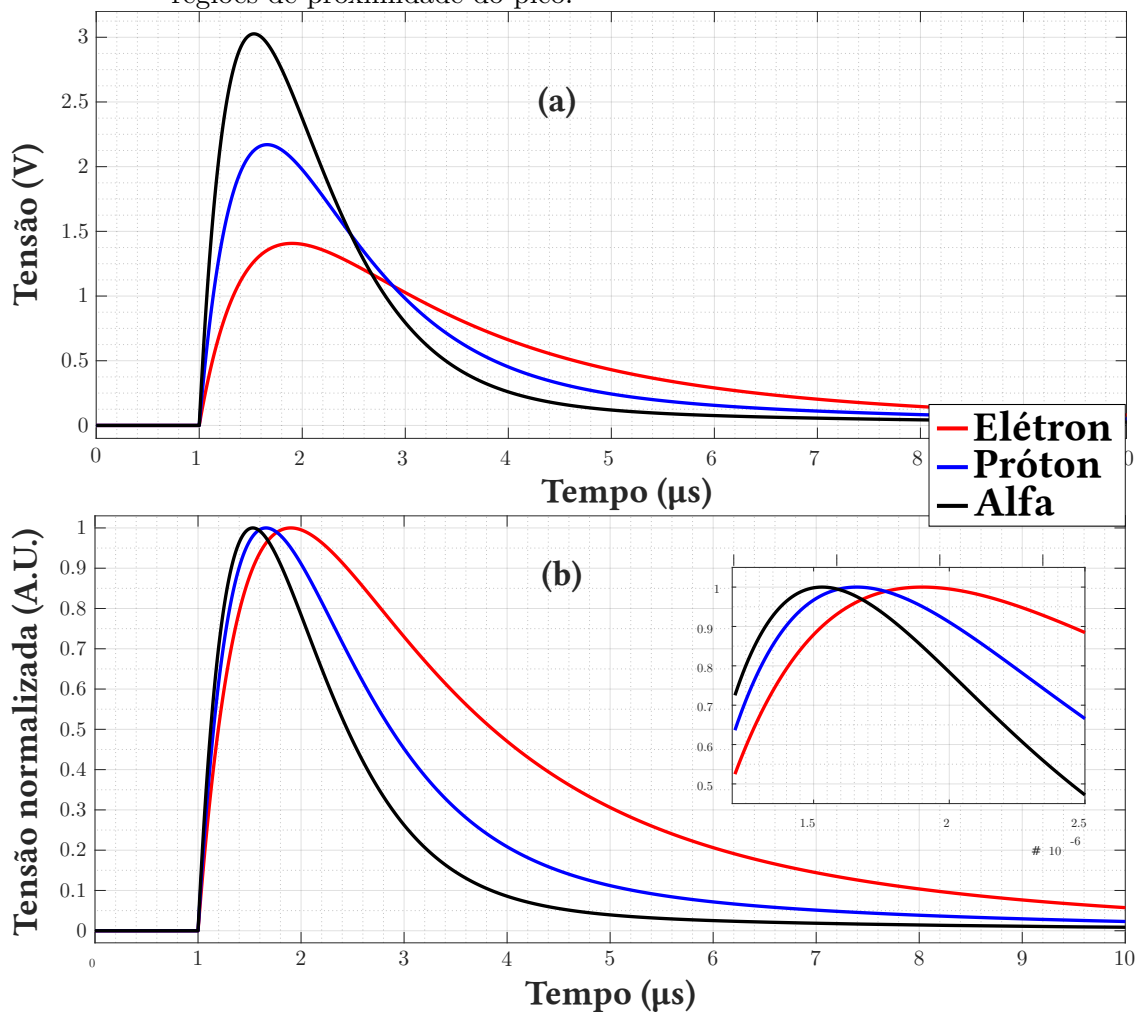
No fim da etapa de amplificação existem conversores digitais com frequência de amostragem de $20MHz$ e $10bits$ de resolução (uma configuração razoável para um componente comum qualificado para o espaço, e.g. the RIO ([PASCHALIDIS, 1999](#))).

6.3 Unidade de Análise

Depois da etapa de digitalização o sinal está pronto para ser analisado por métodos digitais. Na [Figura 6.4](#) é mostrado o formato dos pulsos típicos de tensão digitalizados. A curva apresentada corresponde a tensão gerada depois dos amplificadores (*PreAmp* and *Gain*) no caso de eventos de incidência de partículas (elétrons, prótons e alfa) no cristal com energia de 15 MeV. A unidade de análise possui três funções

principais: (i) estimar a energia total da partícula que originou o pulso, geralmente com métodos de análise de altura de pulso (do inglês, *Pulse height Analysis* - PHA); (ii) a identificação da partículas (do inglês, *Particle Identification* - PID) através de métodos de análise do formato do pulso (do inglês, *Pulse Shape Analysis* - PSA); (iii) e por fim, contar o número de partículas que atingem o detector e geram os pulsos.

Figura 6.4 - (a) Formato do sinal de pulso do detector na saída do amplificador linear *GainAmp* para o caso de três partículas diferentes com 15 MeV, atingindo o cintilador no instante $1\mu s$. (b) O mesmo sinal normalizado com destaque das regiões de proximidade do pico.



Em geral, para obter a energia depositada em detectores, é analisado a tensão de pico dos pulsos de tensão resultantes de cada partícula detectada. Pode-se considerar que o valor do nível de tensão máxima tem relação linear aos valores de energia

depositada pela partícula incidente, em altas energias (superiores a 1 MeV) (MURRAY; MEYER, 1961). Os métodos para estimação de energia com essa abordagem são chamados de PHA. Em contraste, existem outros métodos de análise do pulso que utilizam seu formato para extrair outras informações, e.g. no caso do CsI(Tl) a espécie da partícula que originou o evento. Esses métodos são chamados PSA. Em sistemas de detecção analógicos, vários filtros discriminadores são aplicados no pulso primário do detector, com o propósito de adequar o sinal para os módulos PHA e PSA. A quantidade de componentes eletrônicos necessários para realizar tais tarefas é extremamente elevada. Com a análise digital, ainda que alguns componentes analógicos sejam ainda essenciais como apresentado na Seção 6.2, diversos filtros necessários para as técnicas de PHA e PSA são montados digitalmente através de algoritmos dedicados em um processador, o que reduz a complexidade do sistema de detecção.

O primeiro parâmetro analisado para avaliação do sinal é o máximo local dos pulsos. Isto é realizado por rotinas de varredura dos pulso digitalizados o qual identifica posições com valores maiores que suas vizinhanças através de sucessivas comparações. Ao identificar os picos também pode-se estimar a contagem de eventos. Para relacionar o valor de pico com a energia depositada no detector é necessário calibração por meio de eventos conhecidos. Isto é feito com a simulação de incidências de partículas com energias crescentes e o eventual registro de seus picos. Uma função de primeira ordem é ajustada com os dados registrados e assim o instrumento é calibrado. Essa etapa deve ser realizada para cada uma das partículas a ser detectada, dado que a deposição de energia é relativa a capacidade de ionização.

A espécie da partícula que promoveu um evento é determinada por um segundo estágio de análise dos pulsos que interpreta seu formato (PSA). Essa fase é desenvolvida com foco em obter parâmetros do pulso digitalizado (Figura 6.4a) que descreva seu formato e com isso classificar a partícula que o originou. É importante destacar que os métodos de PSA devem ser finamente sintonizados de forma a isolar os parâmetros de formato do pulso que de fato identifiquem o tipo da partícula. Esse processo pode ser trabalhoso e custoso. Mudanças ambientais, tais como temperatura e pressão, ou até mesmo construtivas, como a alteração do formato do cristal, podem modificar a curva de luminescência de modo a impor novas sintonizações do PSA.

Uma das ações tomadas para aumentar a generalização da análise do formato do pulso é utilizar valores normalizados ao pico do mesmo (Figura 6.4b). Uma solução adicional é proposta, com base na utilização de algoritmos com capacidade de

aprendizado que podem adaptar facilmente a mudanças operacionais dado através de treinamento supervisionado. Isto automatiza a sintonia dos parâmetros do PSA. Propõe-se o uso de redes neurais artificiais com arquitetura *perceptron* multicamadas, descrita na próxima seção

A etapa de PSA tem a função de destacar as características do pulso que define seu formato para então classificar a partícula incidente. Para simplificar a análise, escolheu-se trabalhar com uma pequena amostra do pulso, especificamente em regiões visivelmente sensíveis ao tipo da partícula. Como mostrado na Figura 6.4b, é observado algumas partes desiguais entre os pulsos originados por partículas diferentes com mesma energia. Portanto, é apropriado coletar amostras dessas regiões para discriminar o formato do pulso de cada partícula. Desse modo define-se como vetor de características o conjunto de amostras coletadas de um pulso usados para sua classificação. O algoritmo classificador desenvolvido trabalha com esse vetor de entrada.

Em geral, um algoritmo de reconhecimento de padrões é capaz de agrupar elementos pela similaridade de suas características, de modo que também é chamado de classificador. O primeiro passo no desenvolvimento de um classificador é a definição de quais características dos elementos-alvo devem ser analisadas para agrupá-las nas correspondentes classes de interesse. Neste trabalho, o elemento alvo é o pulso de corrente que deve ser classificado em três classes distintas: (i) elétron, (ii) próton e (iii) alfa.

O agrupamento dos elementos-alvo é realizado por meio da aplicação de determinadas regras, comumente chamadas de base de conhecimento, sobre diferentes entradas (vetor características). Essas regras são definidas por meio de treinamento com o uso elementos-alvo com classificação conhecida. Existem diversos métodos e arquiteturas para definir a base de conhecimento. Neste trabalho usou-se a arquitetura baseada em redes neurais do tipo *perceptron* com propagação retroativa para definição da base de conhecimento.

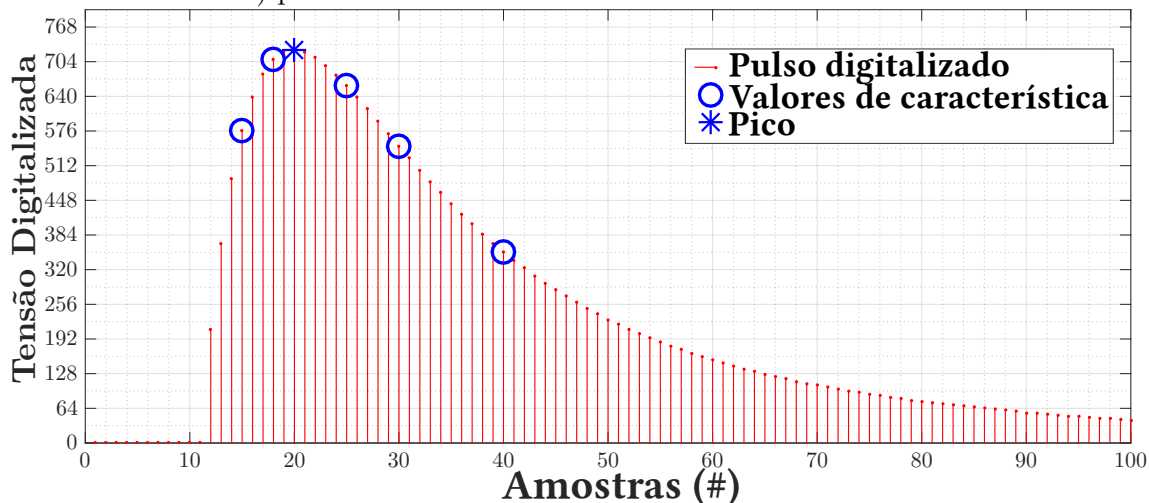
O conceito por trás dessa abordagem vem do modelo matemático da entidade primitiva chamada neurônio *perceptron*. O nome é inspirado no funcionamento essencial de um neurônio biológico. Neste modelo diferentes níveis de entrada (estímulo) são submetidas a funções de ativação que definem uma saída de duplo estado. Se o estímulo é suficiente para ativar a função, a saída assume um estado "ativado", caso contrario o estado padrão "não ativado". Com uso de várias entidades deste tipo conectadas em rede é possível obter diferentes configurações dos estados de saída.

Desse modo é possível obter multi estados de saída através de bi-estados individuais. O modo como as entidades são conectadas definem a arquitetura da rede. Usou-se neste trabalho uma rede com varias camadas da entidade perceptron, onde as características de entrada são passadas para cada neurônio na camada de entrada, e as saídas dos mesmos sendo a entrada da próxima camada e assim sucessivamente até a camada final.

A entidade fundamental do algoritmo, o neurônio perceptron, funciona da seguinte maneira: cada uma das entradas, valores do vetor de características, é submetida a um certo ganho e depois é somada. Se o valor resultante for maior que uma dada referência, o sinal de saída do neurônio *perceptron* é ativado, caso contrário, o neurônio não é ativado. Os valores de ganho e *bias* definem o conhecimento do neurônio.

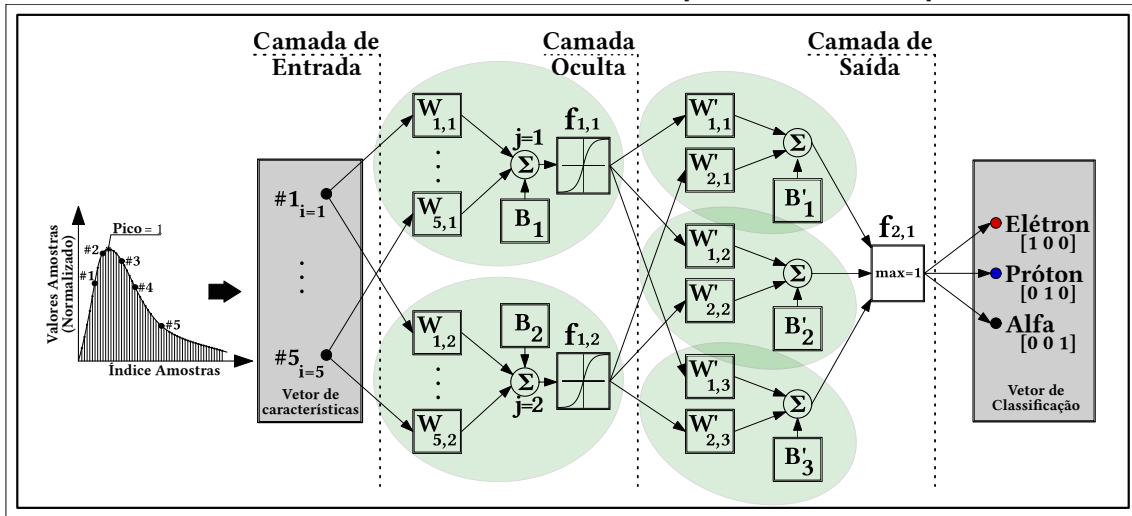
O algoritmo desenvolvido utiliza, como parâmetros de entrada, características quantificadas do pulso a ser classificado. Na forma de pulso, ilustrada na Figura [Figura 6.4b](#) é possível observar algumas regiões de pulso que são muito diferentes umas das outras, principalmente nas extremidades. Essa peculiaridade pode ser usado para discriminação. No entanto, os valores afastados do pico são mais propícios a degradação dado eventos de sobreposição de pulsos (pilleup). Nesse sentido, escolheu-se, como entrada para o classificador, amostrar cinco valores digitalizados do pulso próximos ao índice de pico. Esses pontos compõem o vetor de característica do pulso. Os valores são coletados no pulso digitalizado, no qual duas posições são selecionadas antes do pico e as outras três após o pico. Assim, o vetor de características resultante é uma coleção de valores do pulso digitalizado com índice: $[p-5p-2p+5p+10p+20]$, em que p é a posição de pico, Figura [Figura 6.5](#).

Figura 6.5 - Posições dos valores amostrados para compor o vetor características usado no classificador neural. Cinco valores são tomados nas posição de índice: $[p - 5, p - 2, p + 5, p + 10, p + 20]$, o qual p é a posição de pico nas amostras de pulso do vetor digitalizado. O vetor de características é normalizado em relação ao seu pico. O pulso atual é obtido com uma simulação do detector MV (modelo virtual) para um caso de elétrons de 15 MeV.



No PSA proposto, os vetores de características dos pulsos digitalizados são usados como entradas para uma rede neural perceptron, Figure Figura 6.6, composta por três camadas: camada de entrada; camada oculta (dois neurônios); e uma camada de saída (três neurônios). Os neurônios estão destacados em verde. Os valores das características ($i = 1$ a 5) são entradas de todos ($j = 1$ a 2) neurônios na camada oculta, que simboliza duas sequências de operações: (i) soma das entradas, multiplicadas um um peso (W_{ij}), com uma dada referência (*bias* B_j); e (ii) submeter o resultado anterior a uma função de ativação (no caso uma função sigmoide $f_{1,j}$) com saída limitada entre 0 e 1. A camada de saída tem neurônios com comportamento semelhante, no entanto, a resposta da função de ativação fornece a estimativa de classe correspondente. Esta função encontra o maior valor de entrada e atribui a saída de mesmo índice o valor 1, e 0 para os demais. Por exemplo, se o resultado do somatório das entradas $W'_{1,1}$, $W'_{2,1}$ e B'_1 é maior que os dois outros somatórios da camada de saída, a função $f_{2,1}$ define o valor "1" para a primeira posição da saída e "0" para as duas restantes. Dessa maneira, o classe indicada corresponde a um elétron. Caso valor "1" seja definido na segunda posição da saída, então tem-se um próton, e caso ocorra na terceira, uma partícula alfa. A base de conhecimento para agrupar as entradas as correspondentes saídas é essencialmente definida pelos valores dos parâmetros (de ganhos, bias, e função de ativação) obtidos por treinamento da rede.

Figura 6.6 - Esquema da arquitetura da rede neural usada para classificar as partículas. Os valores das características ($i= 1$ a 5) são entradas de todos ($j = 1$ a 2) neurônios na camada oculta, que simboliza duas sequencias de operações: (i) soma das entradas, multiplicadas um um peso (W_{ij}), com uma dada referencia (*bias* B_j); e (ii) submeter o resultado anterior a uma função de ativação (no caso uma função sigmoide $f_{1,j}$) com saída limitada entre 0 e 1. A camada de saída tem neurônios com comportamento semelhante, no entanto, a resposta da função de ativação fornece a estimativa de classe correspondente. Esta função encontra o maior valor de entrada e atribui a saída de mesmo índice o valor 1, e 0 para os demais. A classificação é definida pela índice onde existe o valor 1, com correspondência ao vetor [elétron próton alfa].



De forma resumida a unidade de análise pode ser analisada pelo esquema da Figura 6.7

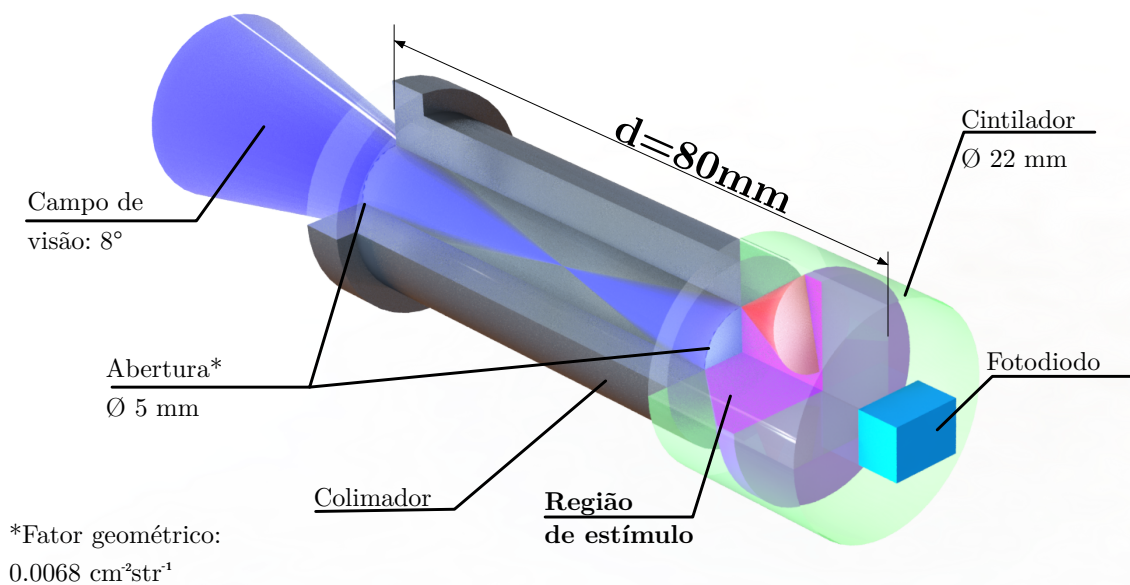
Figura 6.7 - Esquema resumido de processos da unidade de análise criada.



6.4 Unidade de Colimação e Proteção

Pela excelência apresentada com os trabalhos do REPTile no que diz respeito ao desenvolvimento do colimador e do envelope de proteção contra radiação do instrumento, escolhe-se propor uma abordagem semelhante. O material para o envelope também seria o alumínio (Al) e o colimador composto por discos de tântalo. Contudo, nos documentos do REPTile estudados não foi encontrado detalhamento sobre a espessura de e dimensões de tais. A camada de alumínio foi dimensionada com auxílio do software que estima o poder de parada e penetração de íons na matéria, o SRIM (sigla do inglês, *The Stopping and Range of Ions in Matter*), com a simulação da penetração máxima de prótons e elétrons de energia até 100 MeV. Resultou-se numa estimativa de espessura do envelope de cerca de 3 cm. Entre o colimador e a unidade de detecção foi também adicionado a janela de berílio para filtrar partículas de baixa energia. A Figura 6.8 mostra a renderização 3D do esquema da unidade de colimação e proteção.

Figura 6.8 - Esquema ilustrativo da unidade de colimação e proteção de radiação proposta.



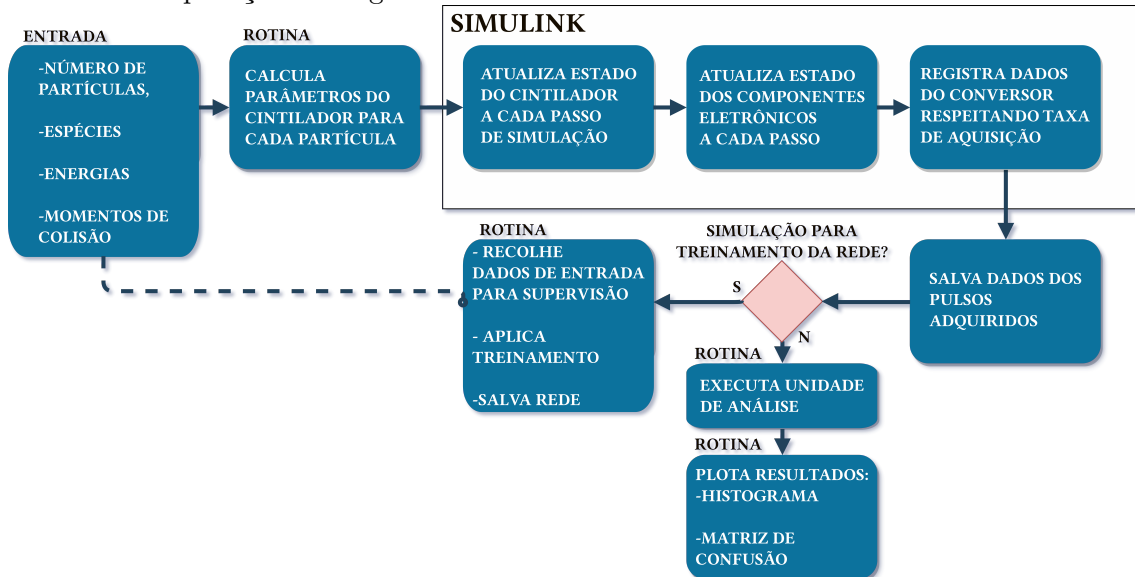
7 SIMULAÇÕES

Neste capítulo é mostrado a eficiência do modelo de detecção proposto. A avaliação é realizada por simulações das resposta do modelo ao ter sua unidade sensora atingida por partículas parametrizadas quanto espécie, energia e instante em que a colisão ocorre. O processo de simulação compreende as seguintes unidades: (i) a luminescência produzida no cintilador dado o estímulo de entrada (unidade sensora - i); a curva de tensão resultante na saída dos amplificadores (unidade de formatação - ii); e finalmente a resposta dos detectores (unidade de análise - iii). Os passos intermediários essenciais para permitir a simulação completa do sistema, e.g. o processo de treinamento, são também descritos no que segue.

As simulações são feitas com suporte da plataforma MATLAB/SIMULINK, onde as variáveis de estado do modelo são atualizadas em intervalos de tempo definidos (passos de tempo - *steps*), fixos ou dinâmicos. Escolheu-se o dimensionamento dinâmico dos *steps*, para otimizar a convergência e velocidade da simulação. Definiu-se o *step* máximo cerca de 10 ns e o mínimo de 1 ns , gerenciados pela própria plataforma de simulação.

A visão geral resumida dos procedimentos realizados na simulação são apresentados no esquema da [Figura 7.1](#) e detalhados na sequência.

Figura 7.1 - Esquema resumido de procedimentos necessários para executar uma simulação do modelo criado. Primeiro tem-se a entrada de parâmetros do feixe de radiação a ser simulado, seguido pelo cálculo das componentes do cintilador para produção de seu sinal luminoso. Dentro da plataforma SIMULINK o modelo os estados do são atualizados em cada passo de tempo. Finalizada o tempo total de simulação, são executados rotinas para coleta de dados e aplicação dos algoritmos da unidade de análise.



7.1 Parâmetros da Simulação

De modo a analisar a resposta do sistema de detecção, simulou-se três espécies de partículas (elétrons, prótons e alfa) em diferentes faixas de energia, distribuídas de forma aleatória com períodos definidos. A parametrização desses estímulos definem os parâmetros de resposta, em luminescência, do cristal de CsI(Tl). Desse modo os estímulos são parametrizados por uma matriz de tamanho $[n \times 6]$, o qual n é a quantidade de partícula simuladas em uma seção. Nesta matriz cada linha representa uma partícula simulada, e as colunas os parâmetros necessários para construção do sinal (luminescência do CsI(Tl)) correspondentes i.e. o tipo da partícula (E_s), o instante da colisão (I_c), e os componentes da curva de emissão do cintilador: energia; intensidade da componente rápida e lenta (h_s, h_f), e constante de decaimento lenta (t_s). A Tabela 7.1 mostra a parametrização de 10 partículas separadas no tempo por $20\mu s$. Após a definição das entradas o tempo de simulação total é calculado e inicia-se a simulação com os sinais de cada unidade atualizados a cada passo de tempo.

No fim da simulação, obtém-se o vetor com os pulsos digitalizados, e então os algo-

ritmos de análise (PHA e PSA) são aplicados.

Tabela 7.1 - Tabela da descrição dos parâmetros de entrada de uma simulação do modelo de detector proposto para o caso da incidência de 10 partículas no cintilador

Espécie da partícula (E_s)	Energia (E MeV)	Instante da colisão (I_{cus})	H_s (10^5 fótons)	H_f (10^5 fótons)	τ_f (ns)
Elétron	4	1.0	1.1799	1.3801	934.35
Próton	2	21.0	0.3677	0.9123	637.31
Alfa	35	41.0	4.8722	17.5278	675.93
Alfa	35	61.0	4.2929	18.1071	626.32
Elétron	4	81.0	1.1441	1.4159	881.90
Elétron	5	101.0	1.4994	1.7006	977.18
Elétron	2	121.0	0.5319	0.7481	760.18
Elétron	3	141.0	0.8649	1.0551	828.31
Próton	37	161.0	9.0882	14.5918	908.44
Próton	32	181.0	8.0257	12.4543	904.21

7.2 Treinamento da Rede Neural

O treinamento da rede neural consiste em variar os parâmetros da rede (ganhos e *biases*) sistematicamente, a um dado conjunto de entradas (características) de classes conhecidas, até alcançar uma eficiência de classificação adequada. Para a etapa de treino do algoritmo proposto usou-se simulações com 1000 partículas divididas igualmente entre elétrons, prótons e alfas com energias na faixa de 1 a 50 MeV. Essas partículas incidem no cintilador a cada 20 microssegundos, para evitar sobreposições de sinal. O fluxo de geração de sinais na simulação segue seu comportamento padrão, ou seja, gera-se o sinal luminoso, amplifica-o e digitaliza-o. Os pulsos são identificados nos dados digitalizados e devidamente amostrados para definição do vetor de características dos mesmos. Nessa etapa sabe-se a qual partícula o vetor de características corresponde. Desse modo, pode-se supervisionar o treinamento, realizado com auxílio do Matlab, pelo método de propagação retroativa (*backpropagation*) e regularização Bayesiana.

7.3 Resultados das Simulações

Numa situação real, é esperado que o detector seja atingido por partículas com uma distribuição estocásticas de E, E_s e I_c . Para a análise genérica do modelo proposto, definiu-se uma distribuição randômica desses parâmetros, com exceção do I_c o qual

considerou-se quatro casos de intervalos entre colisões: 5μ ; $10\mu s$; $15\mu s$; e $20\mu s$. Dessa maneira, é possível observar o comportamento do sistema classificador com respeito a sua capacidade de distinguir o tipo de partícula numa sequência misturada de espécies, além de verificar os limites mínimos dos intervalos de tempo entre dois estímulos.

Em cada simulação, considerou-se 1000 partículas randomicamente distribuídas em especie e na faixa de energia de 1 a 10 MeV, para elétrons, e 1 a 50 MeV para prótons e alfa. O sorteio desses parâmetros são usados para gerar a matriz de entrada da simulação, semelhante a [Tabela 7.1](#), a qual é armazenada para comparação da resposta final do modelo. A [Tabela 7.2](#) apresenta um resumo da comparação dos dados de classificação (de entrada e estimados pelo modelo), em quatro simulações com os intervalos de tempo considerados. A simulação com incidência de partículas no cintilador a cada $5\mu s$ indica que para um fluxo de partículas de $2 \cdot 10^6 \text{particulas/s}$ a resposta do detector é criticamente degradada. Em contrapartida, para fluxo cerca de $7 \cdot 10^4 \text{particulas/s}$ (intervalo entre partículas de $15\mu s$) o classificador alcança resultados muito satisfatórios. Esses dados permitem analisar os limites máximo da taxa de contagem do detector.

Por fim, simulou-se a detecção de partículas pelo modelo de forma a analisar de forma mais sistêmica sua resposta a diferentes faixas de energia, tanto em função da classificação, quanto da contagem e estimação de energia. A simulação foi definida de forma a criar uma certa quantidade fixa de partículas em canais crescentes de energia com passo de 1 MeV. Em cada canal tem-se uma proporção igual entre as partículas. Os canais de energia para elétrons compreende a faixa de 1 a 10 MeV. Para prótons e alfa a faixa é de 1 a 50 MeV. Simulou-se 33 partículas por canal para cada especie. Cada canal portanto possui 99 partículas misturadas. Para canais acima de 10 MeV os elétrons foram considerados com energia constante de 10 MeV. A simulação de todos os canais conta com o total de 2970 partículas. Considerou-se um intervalo de tempo de $20\mu s$ entre a incidência de espécies na superfície do cintilador.

Na [Figura 7.2](#) a barra azul significa a contagem de partículas por canal. A linha vermelha é traçada para mostrar o total de partículas simuladas em cada canal. Quando a barra azul ultrapassa a linha vermelha, isso significa que ocorreu uma contagem excessiva. Por exemplo, na barra azul [Figura 7.2b](#), o canal 14 MeV ultrapassou a linha em uma unidade, e em [Figura 7.2c](#), a mesma canal é sub-contado por uma unidade. Isso significa que uma partícula alfa com energia igual a 14 MeV é classificada como um próton. O gráfico de barras vermelhas mostra o desvio pa-

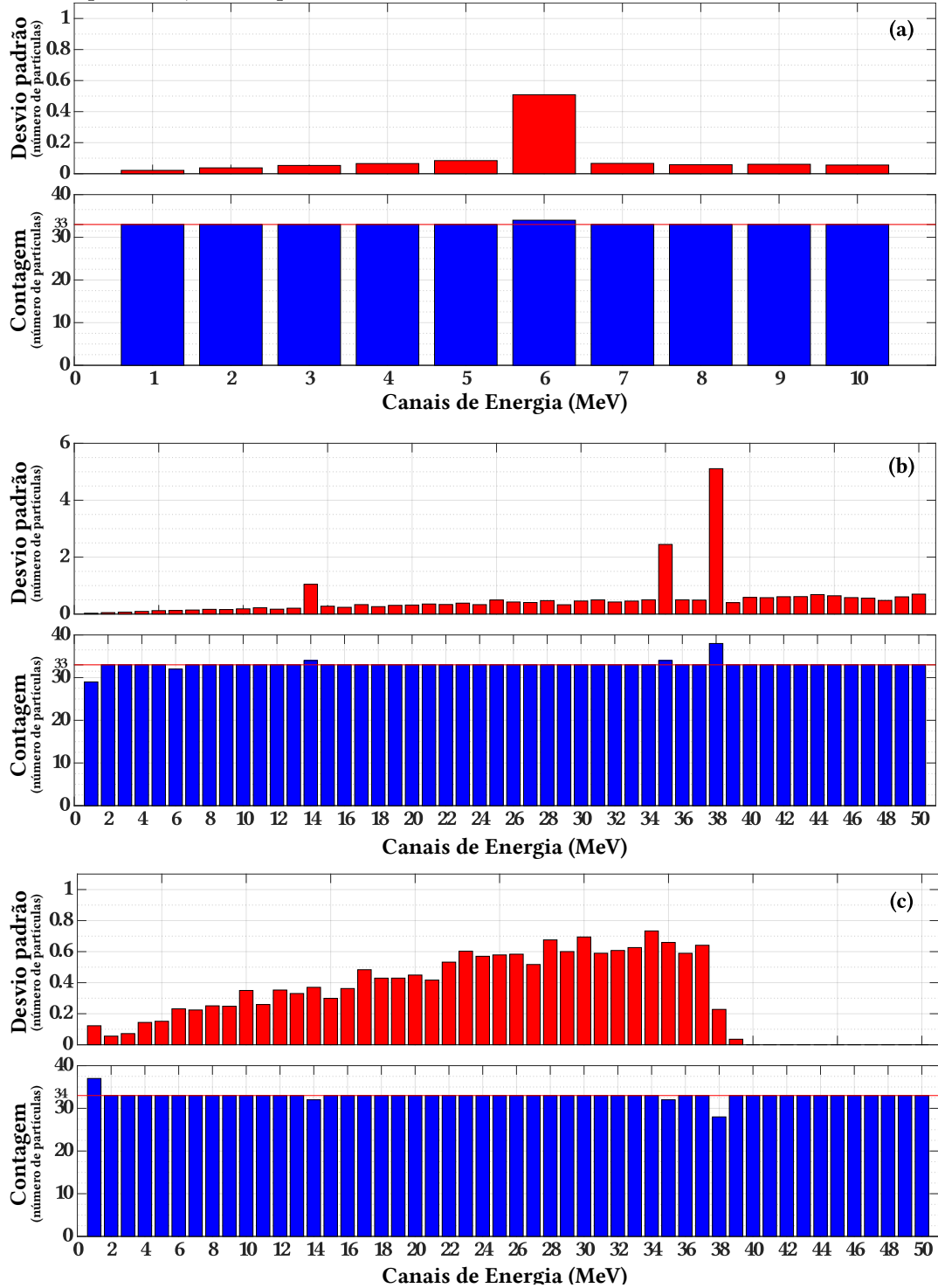
drão da energia estimada em cada canal. Nota-se que para cada canal com erro de contagem, o desvio padrão em energia é alto. Para explicar esse comportamento é necessário lembrar que a estimativa de energia está relacionada com a altura do pulso que por sua vez é definida pela luminescência do cintilador. Para partículas de energia mais altas, o tempo de decaimento dessas luminescências aumenta, o que conduz a um pulso de pico diferente no amplificador de carga, quando o tempo constante é pequeno. Este efeito é chamado de deficiente balístico. Desta forma, se uma partícula alfa é classificada como um próton, a energia estimada é maior que a real, porque foi aplicada a calibração de energia usada para os prótons.

Os resultados apresentados na [Tabela 7.2](#) e [Figura 7.2](#) mostram que o sistema sensor proposto (constituído por 3 unidades básicas) é capaz de distinguir entre elétrons, prótons e alfa com uma eficiência de mais de 60 % para diferentes partículas incidentes a cada $5\mu s$ e mais de 95 % para partículas incidentes em intervalos maiores que $15\mu s$. Além disso, para as três espécies de partículas simuladas, o desvio padrão em energia é menor que 1 MeV para a maioria dos canais de energia simulados.

Tabela 7.2 - Matriz de confusão. As tabelas apresentam quatro casos de simulações diferentes, com intervalos de tempo de incidência (a) 5μ , (b) $10\mu s$, (c) $15\mu s$, and (d) $20\mu s$. A soma de cada linha é o total de partículas desta classe identificadas pelo algoritmo implementado. A soma de cada coluna é o total real das partículas simuladas dessa classe. Na tabela (d), linha 1/columna 1 observa-se que das 329 partículas simuladas de elétrons todas foram classificadas corretamente como elétrons. Entretanto das 326 partículas simuladas como prótons (soma da coluna 2), 6 dessas foram classificadas como elétrons (linha 1/columna2).

(a) $5\mu s$		Partículas Simuladas			Total (%)
		elétron	próton	alfa	
Est.	elétron	316	202	93	51.7
	próton	0	125	79	61.3
	alfa	0	0	185	100
Total (%)		100	38.2	51.8	62.6
(b) $10\mu s$		Partículas Simuladas			Total (%)
		elétron	próton	alfa	
Est.	elétron	327	53	1	85.8
	próton	0	300	58	83.8
	alfa	0	1	260	99.6
Total (%)		100	84.7	81.5	88.7
(c) $15\mu s$		Partículas Simuladas			Total (%)
		elétron	próton	alfa	
Est.	elétron	373	15	0	96.1
	próton	1	300	5	98.0
	alfa	0	0	306	100
Total (%)		99.7	95.2	98.4	97.9
(d) $20\mu s$		Partículas Simuladas			Total (%)
		elétron	próton	alfa	
Est.	elétron	329	6	0	98.2
	próton	0	319	0	100
	alfa	0	1	345	99.7
Total (%)		100	97.9	100	99.3

Figura 7.2 - Resposta do modelo de detecção para uma simulação incidência de 4950 partículas, igualmente distribuídas em 50 canais de energia. Essas 99 partículas por canal são divididas em: (a) elétron, (b) próton e (c) alfa. Em azul um histograma com as frequências de contagem de cada canal e vermelho o desvio padrão da estimativa de energia. Na partícula alfa, para energias acima de 38 MeV, o componente ADC satura mantendo valor máximo constante, sem portanto, desvio padrão.



8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De forma geral, observa-se que existem elementos similares nos instrumentos das missões observadas. O que mais se destaca, pela variadas metodologias, é o elemento sensor. Tanto na composição do material quanto em sua montagem, disposição e agrupamento observam-se dois elementos comuns, o semicondutor 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 estudadas, o que possibilita diferentes análises da radiação incidente. Essa particularidade se 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 o formato (tempo de subida, passagem por zero, entre outros).

Neste trabalho, foi proposto um projeto conceitual de um detector de elétrons e prótons de alta energia para aplicação espacial em pequenos satélites. Um estudo de sua operação e responsividade é realizado através de simulações computacionais. Os parâmetros dos subsistemas do modelo foram definidos com base em dados de diferentes trabalhos experimentais. Dado a limitação dimensional de um CubeSat, o volume do detector foi o parâmetro mais sensível para escolha das tecnologias definidas (os componentes eletrônicos frontais e o processamento digital posteriormente). A adoção de um elemento sensor baseado em cristal de iodeto de cério, foi direcionada mais fortemente pela maior acessibilidade do material, em comparação a tecnologia baseada em silício de grande pureza. Os métodos e técnicas escolhidos são todos muito bem descritos na literatura, o que possibilita conhecer sua eficácia. Na tarefa de identificar os sinais gerados pelo cintilador, formatados e amostrados por eletrônica, é proposto um novo método baseado em um classificador neural *perceptron*. Este último, no entanto, como não existe estudo anterior, foi verificado através de reconstrução virtual dos sinais do cintilador e as devidas interações com os outros componentes. Nesta circunstância, o método apresentou uma eficiência de classificação de cerca de 98 %. De acordo com os resultados obtidos, pode-se verificar que o modelo conceitual proposto é capaz de cumprir os objetivos pretendidos, que são: a contagem, determinação de energia e classificação das partículas presentes no cinturão de radiação. O algoritmo classificador proposto obteve bons resultados, com reduzido e simples processamento computacional. A estimativa de energia também foi verificada como sendo possível com o uso de apenas dois componentes ADC na

frequência de 10MHz e resolução de 10 bits. No entanto, alguma atenção deve ser tomada à taxa de contagem do detector. No modelo desenvolvido, partículas separadas de $15\mu s$ (cerca de $6,6 \cdot 10^4$ partículas por segundo) foram totalmente contadas, sem perdas e sem efeitos expressivos de sobreposição (*pilleup*). Para os testes considerando tempo de incidência inferior a $15\mu s$ houve uma mudança na resposta do detector. Com intervalo de tempo de cerca de $5\mu s$ é observada degradação de vários sinais. Assim, a topologia conceitual proposta está alinhada com a aplicação em questão. Os resultados obtidos por simulação são interessantes e encorajadores para estudos mais avançados do modelo do detector, como análises de ruído, proteção de radiação e testes laboratoriais de um protótipo funcional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AERONAUTICS, N.; (NASA), S. A. **rPlot instructions**. 2018. Disponível em:
<<http://rbspgateway.jhuapl.edu/rPlotTime?smr>>. 4

AERONAUTICS, N.; NASA, S. A. **Studying the Van Allen belts 60 years after america's first spacecraft**. 2018. Disponível em:
<<https://www.nasa.gov/feature/goddard/2018/studying-the-van-allen-belts-60-years-after-america-s-first-spacecraft>>. 3

ALARJA, J.; DAUCHY, A.; GIORNI, A.; MORAND, C.; POLLACO, E.; STASSI, P.; BILLEREY, R.; CHAMBON, B.; CHEYNIS, B.; DRAIN, D.; PASTOR, C. Charged particles identification with a CsI(Tl) scintillator. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, v. 242, n. 2, p. 352–354, jan 1986. ISSN 01689002. Disponível em:
<<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0168900286902329>>. 78

ALEXANDER, T.; GOULDING, F. An amplitude-insensitive system that distinguishes pulses of different shapes. **Nuclear Instruments and Methods**, v. 13, n. C, p. 244–246, aug 1961. ISSN 0029554X. Disponível em:
<<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0029554X61901987>>. 20

BAKER, D.; MASON, G.; FIGUEROA, O.; COLON, G.; WATZIN, J.; ALEMAN, R. An overview of the Solar Anomalous, and Magnetospheric Particle Explorer (SAMPEX) mission. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 31, n. 3, p. 531–541, may 1993. ISSN 01962892. Disponível em:
<<http://ieeexplore.ieee.org/document/225519/>>. 64

BAKER, D. N.; KANEKAL, S. G.; HOXIE, V. C.; BATISTE, S.; BOLTON, M.; LI, X.; ELKINGTON, S. R.; MONK, S.; REUKAUF, R.; STEG, S.; WESTFALL, J.; BELTING, C.; BOLTON, B.; BRAUN, D.; CERVELLI, B.; HUBBELL, K.; KIEN, M.; KNAPPMILLER, S.; WADE, S.; LAMPRECHT, B.; STEVENS, K.; WALLACE, J.; YEHLE, A.; SPENCE, H. E.; FRIEDEL, R. The Relativistic Electron-Proton Telescope (REPT) instrument on board the Radiation Belt Storm Probes (RBSP) spacecraft: characterization of Earth's radiation belt high-energy particle populations. **Space Science Reviews**, v. 179, n. 1-4, p. 337–381, nov 2013. ISSN 0038-6308. Disponível em:
<<http://link.springer.com/10.1007/s11214-012-9950-9>>. 69, 70

BARTH, J.; DYER, C.; STASSINOPOULOS, E. Space, atmospheric, and terrestrial radiation environments. **IEEE Transactions on Nuclear Science**, v. 50, n. 3, p. 466–482, jun 2003. ISSN 0018-9499. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1208571/>>. 9

BENRACHI, F.; CHAMBON, B.; CHEYNIS, B.; DRAIN, D.; PASTOR, C.; SEGHIER, D.; ZAID, K.; GIORNI, A.; HEUER, D.; LLÈRES, A.; MORAND, C.; STASSI, P.; VIANO, J. Investigation of the performance of CsI(Tl) for charged particle identification by pulse-shape analysis. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, v. 281, n. 1, p. 137–142, aug 1989. ISSN 01689002. Disponível em: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0168900289912254>>. xvii, 78, 79

BIG BEAR SOLAR OBSERVATORY. **Mancha solar**. 2010. Disponível em: http://www.bbso.njit.edu/gallery/sunspot{}_tio{}_20100702.jpg>. 36

BIRKS, J. B. **The theory and practice of scintillation counting**. [S.l.]: Departament of Physics University of Manchester, 1964. 662 p. ISBN B0007DX4FS (ASIN). 19, 77, 78

BIZARRI, G. Scintillation mechanisms of inorganic materials: from crystal characteristics to scintillation properties. **Journal of Crystal Growth**, v. 312, n. 8, p. 1213–1215, 2010. ISSN 00220248. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcrysgr.2009.12.063>>. 78

BLAKE, J. B.; FENNELL, J. F.; FRIESEN, L. M.; JOHNSON, B. M.; KOLASINSKI, W. A.; MABRY, D. J.; OSBORN, J. V.; PENZIN, S. H.; SCHNAUSS, E. R.; SPENCE, H. E.; BAKER, D. N.; BELIAN, R.; FRITZ, T. A.; FORD, W.; LAUBSCHER, B.; STIGLICH, R.; BARAZE, R. A.; HILSEN RATH, M. F.; IMHOF, W. L.; KILNER, J. R.; MOBILIA, J.; VOSS, D. H.; KORTH, A.; GÜLL, M.; FISHER, K.; GRANDE, M.; HALL, D. CEPPAD. **Space Science Reviews**, v. 71, n. 1-4, p. 531–562, feb 1995. ISSN 0038-6308. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/BF00751340>>. 66, 67

BOYD, A. J.; TURNER, D. L.; REEVES, G. D.; SPENCE, H. E.; BAKER, D. N.; BLAKE, J. B. What causes radiation belt enhancements: a survey of the Van Allen probes era. **Geophysical Research Letters**, v. 45, n. 11, p. 5253–5259, jun 2018. ISSN 00948276. Disponível em: <http://doi.wiley.com/10.1029/2018GL077699>>. 9

BUCKENS, P.; VEATCH, M. A high performance peak-detect and hold circuit for pulse height analysis. **IEEE Transactions on Nuclear Science**, v. 39, n. 4, p. 753–757, 1992. ISSN 00189499. Disponível em:

<<http://ieeexplore.ieee.org/document/159700/>>. 20

CARRILLO, H. R. V. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment**. ISSN 01689002. 26

COOK, W.; CUMMINGS, A.; CUMMINGS, J.; GARRARD, T.; KECMAN, B.; MEWALDT, R.; SELESNICK, R.; STONE, E.; BAKER, D.; ROSENVINGE, T. von; BLAKE, J.; CALLIS, L. PET: a proton/electron telescope for studies of magnetospheric, solar, and galactic particles. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 31, n. 3, p. 565–571, may 1993. ISSN 01962892. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/225523/>>. 58, 64, 65

CUBESAT. **CubeSat design specification rev. 13**. The CubeSat Program, Cal Poly SLO, 2015. Disponível em: <<http://www.cubesat.org/resources>>. 17

DAGLIS, I. A.; THORNE, R. M.; BAUMJOHANN, W.; ORSINI, S. The terrestrial ring current: origin, formation, and decay. **Reviews of Geophysics**, v. 37, n. 4, p. 407–438, nov 1999. ISSN 87551209. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1029/1999RG900009>>. 50

DIBARI, R. What reliability engineers should know about space radiation effects. In: IEE ANNUAL RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM (RAMS). **Proceedings...** IEEE, 2013. p. 1–2. ISBN 978-1-4673-4711-2. ISSN 0149144X. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6517723/>>. 14

DICHTER, B.; HANSER, F.; SELLERS, B.; HUNERWADEL, J. High energy electron fluxmeter. **IEEE Transactions on Nuclear Science**, v. 40, n. 2, p. 252–255, apr 1993. ISSN 00189499. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/212350/>>. 59, 60

DUZELLIER, S. Radiation effects on electronic devices in space. **Aerospace Science and Technology**, v. 9, n. 1, p. 93–99, jan 2005. ISSN 12709638. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1270963804001129>>. 5, 12

ECOFFET, R. Overview of in-orbit radiation induced spacecraft anomalies. **IEEE Transactions on Nuclear Science**, v. 60, n. 3, p. 1791–1815, jun 2013. ISSN 0018-9499. Disponível em:

<<http://ieeexplore.ieee.org/document/6522550/>>. 1, 12, 13

ESA/NASA/SOHO. **Solar science**. 1995. Disponível em:

<<https://science.nasa.gov/heliophysics/focus-areas/solar-science>>.

Acesso em: 02 dezembro 2017. 30

ESTUDO E MONITORAMENTO BRASILEIRO DO CLIMA ESPACIAL -

EMBRACE. **Definição de clima espacial**. 2014. Disponível em: <<http://www2.inpe.br/climaespacial/portal/definicao-de-clima-espacial/>>. 29

<<http://www2.inpe.br/climaespacial/portal/definicao-de-clima-espacial/>>. 29

FAN, C. Y. Detection of scintillation photons with photodiodes. **Review of Scientific Instruments**, v. 35, n. 2, p. 158–163, feb 1964. ISSN 0034-6748.

Disponível em: <<http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.1718768>>. 80

FENNELL, J. F.; BLAKE, J. B.; CLAUDEPIERRE, S.; MAZUR, J.; KANEKAL, S.; O'BRIEN, P.; BAKER, D.; CRAIN, W.; MABRY, D.; CLEMMONS, J.

Current energetic particle sensors. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 121, n. 9, p. 8840–8858, sep 2016. ISSN 21699380. Disponível em:

<<http://doi.wiley.com/10.1002/2016JA022588>>. 9

FOX, K. C. **NASA's SAMPEX mission: a space weather warrior**. 2012.

Disponível em: <<https://www.nasa.gov/mission{ }pages/sunearth/news/sampex-deorbit.html>>. 64

<<https://www.nasa.gov/mission{ }pages/sunearth/news/sampex-deorbit.html>>. 64

_____. **CME**. 2014. Disponível em:

<<https://www.nasa.gov/content/goddard/what-to-see-in-cme-images/>>.

41

_____. **Flare**. 2017. Disponível em: <<https://www.nasa.gov/feature/goddard/2017/active-region-on-sun-continues-to-emit-solar-flares>>. 42

<<https://www.nasa.gov/feature/goddard/2017/active-region-on-sun-continues-to-emit-solar-flares>>. 42

GRZYWACZ, R. Applications of digital pulse processing in nuclear spectroscopy.

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B:

Beam Interactions with Materials and Atoms, v. 204, n. 2003, p. 649–659,

may 2003. ISSN 0168583X. Disponível em:

<<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168583X02021468>>. 21

HAMZAWY, A. Simple analytical formula to calculate γ -ray cylindrical detectors

efficiencies. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research**

Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, v. 624, n. 1, p. 125–129, dec 2010. ISSN 01689002. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168900210019753>>. 26

HANDS, A. D. P.; RYDEN, K. A.; MEREDITH, N. P.; GLAUERT, S. A.; HORNE, R. B. Radiation effects on satellites during extreme space weather events. **Space Weather**, v. 16, n. 9, p. 1216–1226, 2018. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2018SW001913>>. 9

HORN, D.; BALL, G.; GALINDO-URIBARRI, A.; HAGBERG, E.; WALKER, R.; LAFOREST, R.; POULIOT, J. The mass dependence of CsI(Tl) scintillation response to heavy ions. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, v. 320, n. 1-2, p. 273–276, aug 1992. ISSN 01689002. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0168900292907853>>. 77

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Missão Amazonia-1**. 2018. Disponível em: <<http://www3.inpe.br/amazonia-1/amazonia.php>>. Acesso em: 30 janeiro 2019. 1

IUCCI, N.; LEVITIN, A. E.; BELOV, A. V.; EROSHENKO, E. A.; PTITSYNA, N. G.; VILLORESI, G.; CHIZHENKOV, G. V.; DORMAN, L. I.; GROMOVA, L. I.; PARISI, M.; TYASTO, M. I.; YANKE, V. G. Space weather conditions and spacecraft anomalies in different orbits. **Space Weather**, v. 3, n. 1, p. n/a–n/a, jan 2005. ISSN 15427390. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1029/2003SW000056>>. 13, 14

JOHNSTON, W. R.; O'BRIEN, T. P.; GINET, G. P.; HUSTON, S. L.; GUILD, T. B.; FENNELLY, J. A. AE9/AP9/SPM: new models for radiation belt and space plasma specification. In: PHAM, K. D.; COX, J. L. (Ed.). **Sensors and systems for space applications vii**. [s.n.], 2014. v. 9085, p. 908508. ISBN 9781628410228. ISSN 1996756X. Disponível em: <<http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.2049836>>. 10

KAKU, K. Satellite remote sensing for disaster management support: a holistic and staged approach based on case studies in Sentinel Asia. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 33, p. 417–432, feb 2019. ISSN 22124209. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212420918304801>>. 1

KESTILÄ, A.; TIKKA, T.; PEITSO, P.; RANTANEN, J.; NÄSILÄ, A.;
NORDLING, K.; SAARI, H.; VAINIO, R.; JANHUNEN, P.; PRAKS, J.;
HALLIKAINEN, M. Aalto-1 nanosatellite; technical description and mission
objectives. **Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems**,
v. 2, n. 1, p. 121–130, 2013. ISSN 2193-0864. Disponível em:
<<http://www.geosci-instrum-method-data-syst.net/2/121/2013/>>. 73

KESZTHELYI-LÁNDORI, S.; HREHUSS, G. Scintillation response function and
decay time of CsI(Na) to charged particles. **Nuclear Instruments and
Methods**, v. 68, n. 1, p. 9–12, feb 1969. ISSN 0029554X. Disponível em:
<<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0029554X6990682X>>. 77, 78

KILGUS, U.; KOTTHAUS, R.; LANGE, E. Prospects of CsI(Tl)-photodiode
detectors for low-level spectroscopy. **Nuclear Instruments and Methods in
Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and
Associated Equipment**, v. 297, n. 3, p. 425–440, dec 1990. ISSN 01689002.
Disponível em:
<<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0168900290913256>>. 77

KIRBY, K.; BUSHMAN, S.; BUTLER, M.; CONDE, R.; FRETZ, K.;
HERRMANN, C.; HILL, A.; MAURER, R.; NICHOLS, R.; OTTMAN, G.; REID,
M.; ROGERS, G.; SRINIVASAN, D.; TROLL, J.; WILLIAMS, B. Radiation Belt
Storm Probe spacecraft and impact of environment on spacecraft design. In:
AEROSPACE CONFERENCE, 2012, Montana, USA. **Proceedings...** Big Sky:
IEEE, 2012. p. 1–20. ISBN 978-1-4577-0557-1. ISSN 1095323X. 2

KIVELSON, M. G. Planetary magnetospheres. **Handbook of Solar-Terrestrial
Environment**, p. 469–492, 2007. ISSN 01679295. 29, 46, 51, 52, 54

KNOLL, G. F. **Radiation detection and measurement**. 4. ed. [S.l.]: John
Wiley & Sons, 2010. 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 28, 82

KREUTZ, P.; KÜHMICHEL, A.; PINKENBURG, C.; POCHODZALLA, J.;
GUO, Z.; LYNEN, U.; SANN, H.; TRAUTMANN, W.; TROCKEL, R.
Photodiode readout and pulse shape analysis of CsI(Tl) scintillator signals.
**Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A:
Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**,
v. 260, n. 1, p. 120–123, oct 1987. ISSN 01689002. Disponível em:
<<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0168900287903925>>. 77

LEMPICKI, A.; WOJTOWICZ, A.; BERMAN, E. Fundamental limits of scintillator performance. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, v. 333, n. 2-3, p. 304–311, sep 1993. ISSN 01689002.

Disponível em:

<<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/016890029391170R>>. 77

LI, X. **CSSWE REPTile level1 6sec counts and position**. 2014. Disponível em: <<https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/eval2.cgi>>. 71

MALANOSKI, M.; JENTOFT-NILSEN, M. **World of change: solar activity**. 2013. Disponível em: <<https://svs.gsfc.nasa.gov/30315>>. 39

MAUK, B. H.; FOX, N. J.; KANEKAL, S. G.; KESSEL, R. L.; SIBECK, D. G.; UKHORSKIY, A. Science objectives and rationale for the Radiation Belt Storm Probes Mission. **Space Science Reviews**, v. 179, n. 1-4, p. 3–27, nov 2013. ISSN 0038-6308. Disponível em:

<<http://link.springer.com/10.1007/s11214-012-9908-y>>. 68

MCILWAIN, C. E. Magnetic coordinates. **Space Science Reviews**, v. 5, n. 5, p. 585–598, aug 1966. ISSN 0038-6308. Disponível em:

<<http://link.springer.com/10.1007/BF00167327>>. 55

MEIJER, R.; Van Den BRINK, A.; BAKKUM, E.; DECOWSKI, P.; GRIFFIOEN, K.; KAMERMANS, R. Light-particle detection with a CsI(Tl) scintillator coupled to a double photodiode readout system. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, v. 256, n. 3, p. 521–524, may 1987. ISSN 01689002.

Disponível em:

<<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0168900287902968>>. 77

MOBILIA, J. **Aurora POLAR-PIXIE**. 1997. Disponível em:

<http://pixie.spasci.com/img_{ }dir/archive/1997/Jul/Jul15/image_{ }A1_{ }071597_{ }1517.gif>. 52

MOLDWIN, M. B. **An introduction to space weather**. New York: Cambridge University Press, 2008. ISBN 9780521861496. 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 53, 54

MOSZYNSKI, M.; KAPUSTA, M.; MAYHUGH, M.; WOLSKI, D.; FLYCKT, S. Absolute light output of scintillators. **IEEE Transactions on Nuclear Science**,

v. 44, n. 3, p. 1052–1061, jun 1997. ISSN 00189499. Disponível em:

<<http://ieeexplore.ieee.org/document/603803/>>. 82

MURRAY, R. B.; MEYER, A. Scintillation Response of Activated Inorganic Crystals to Various Charged Particles. **Physical Review**, v. 122, n. 3, p. 815–826, may 1961. ISSN 0031-899X. Disponível em:

<<https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.122.815>>. 85

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA).

Layers of the Sun. 2010. Disponível em:

<<https://observatory.astro.utah.edu/sun.html>>. Acesso em: 03 dezembro 2017. 33

ONOJEGHUO, A. O.; BLACKBURN, G. A.; HUANG, J.; KINDRED, D.; HUANG, W. Applications of satellite ‘hyper-sensing’ in Chinese agriculture: challenges and opportunities. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 64, n. June 2017, p. 62–86, feb 2018. ISSN 03032434. Disponível em:

<<http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2017.09.005><https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0303243417301940>>. 1

PASCHALIDIS, N. A smart sensor integrated circuit for NASA’s new millennium spacecraft. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRONICS, CIRCUITS AND SYSTEMS, 6., 1999, Cyprus. **Proceedings...** Pafos: IEEE, 1999. v. 3, p. 1787–1790. ISBN 0-7803-5682-9. ISSN 09251030. Disponível em:

<<http://ieeexplore.ieee.org/document/814554/>>. 83

PELTONEN, J.; HEDMAN, H.-P.; ILMANEN, A.; LINDROOS, M.; MAATTANEN, M.; PESONEN, J.; PUNKKINEN, R.; PUNKKINEN, A.; VAINIO, R.; VALTONEN, E.; SANTTI, T.; PENTIKAINEN, J.; HAEGGSTROM, E. Electronics for the RADMON instrument on the Aalto-1 student satellite. In: EUROPEAN WORKSHOP ON MICROELECTRONICS EDUCATION (EWME), 10., 2014, Tallinn, Estonia. **Proceedings...** Tallinn: IEEE, 2014. p. 161–166. ISBN 978-1-4799-4016-5. Disponível em:

<<http://ieeexplore.ieee.org/document/6877418/>>. 72

PICH, M. S. S., M.; JUN, I.; EVANS, R. Empirical radiation belt models: comparison with in situ data and implications for environment definition. **Space Weather**, v. 15, n. 9, p. 1165–1176, sep 2017. ISSN 15427390. Disponível em:

<<http://doi.wiley.com/10.1002/2017SW001612>>. 9

POGHOSYAN, A.; GOLKAR, A. CubeSat evolution: analyzing CubeSat capabilities for conducting science missions. **Progress in Aerospace Sciences**, v. 88, p. 59–83, 2017. ISSN 03760421. Disponível em:

<<http://dx.doi.org/10.1016/j.paerosci.2016.11.002>>. 5, 16, 17

PRAKS, J.; KESTILA, A.; TIKKA, T.; NASILA, A.; RIWANTO, B.; JOVANOVIĆ, N.; NIEMELA, P.; SILVA, N.; VAINIO, R.; JANHUNEN, P. Aalto-1 earth observation nanosatellite mission status and in orbit experiments. In: GENERAL ASSEMBLY AND SCIENTIFIC SYMPOSIUM OF THE INTERNATIONAL UNION OF RADIO SCIENCE, 32., 2017, Montreal, QC, Canada. **Proceedings...** Montreal: IEEE, 2017. v. 2017-Janua, p. 1–3. ISBN 9789082598704. Disponível em:

<<http://ieeexplore.ieee.org/document/8105284/>>. 72

PUIG-SUARI, J.; TURNER, C.; TWIGGS, R. J. Cubesat: the development and launch support infrastructure for eighteen different satellite customers on one launch. In: CONFERENCE ON SMALL SATELLITES, TECHNICAL SESSION VIII: CUBESAT MISSIONS, 2001. **Proceedings...** Istanbul: AIAA/USU, 2001. p. 1–5. ISBN 6507238651. Disponível em:

<<https://digitalcommons.usu.edu/smallsat/2001/A112001/59/>>. 16, 17

REEVES, G. D.; MCADAMS, K. L.; FRIEDEL, R. H. W.; O'BRIEN, T. P. Acceleration and loss of relativistic electrons during geomagnetic storms. **Geophysical Research Letters**, v. 30, n. 10, p. n/a–n/a, may 2003. ISSN 00948276. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1029/2002GL016513>>. 5

REIFSNYDER, W. E. Radiation geometry in the measurement and interpretation of radiation balance. **Agricultural Meteorological**, v. 4, n. 4, p. 255–265, jul 1967. ISSN 00021571. Disponível em:

<<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/000215716790026X>>. 26

RENKER, D.; LORENZ, E. Advances in solid state photon detectors. **Journal of Instrumentation**, v. 4, n. 04, p. P04004–P04004, apr 2009. ISSN 1748-0221. Disponível em: <<http://stacks.iop.org/1748-0221/4/i=04/a=P04004?key=crossref.0b2aaff32d46c072c53ee73cbf621d59>>. 80

ROBINSON, R. M.; MORETTO, T. Small satellites for space weather research.

Space Weather, v. 6, n. 5, 2008. Disponível em: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2008SW000392>>. 5, 17

SAINT-GOBAIN CRYSTALS. **CsI (Tl), CsI (Na) cesium iodide scintillation material**. [S.l.]: Saint-Gobain Ceramics & Plastics, 2017. 79

SCHILLER, Q.; GERHARDT, D.; BLUM, L.; LI, X.; PALO, S. Design and scientific return of a miniaturized particle telescope onboard the Colorado Student Space Weather Experiment (CSSWE) CubeSat. In: **AEROSPACE CONFERENCE**, 2014, Big Sky, MT, USA. **Proceedings...** Big Sky: IEEE, 2014. p. 1–14. ISBN 978-1-4799-1622-1. ISSN 1095323X. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6836372/>>. 11, 71, 72

SCHWENN, R. Space weather : the solar perspective imprint / terms of use. **Living Reviews in Solar Physics**, n. 2006, 2010. 39, 42, 43, 44, 46

SOSA, C. S.; FLASKA, M.; POZZI, S. A. Comparison of analog and digital pulse-shape-discrimination systems. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment**, v. 826, p. 72–79, 2016. ISSN 01689002. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2016.03.088>>. 21

SPITZER JUNIOR, L. Report to project rand: astronomical advantages of an extra-terrestrial observatory. **Astronomy Quarterly**, v. 7, n. 3, p. 131–142, jan 1990. ISSN 03649229. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/036492299090018V>>. 1

SPREITER, J. R.; SUMMERS, A. L.; RIZZI, A. W. Solar wind flow past nonmagnetic planets-Venus and Mars. **Planetary and Space Science**, v. 18, n. 9, p. 1281–1299, 1970. ISSN 00320633. 31

STIX, M. **The Sun: an introduction**. 2. ed. [S.l.: s.n.], 2012. 492 p. ISBN 3642560423, 9783642560422. 32, 33, 43

STOREY, R. S.; JACK, W.; WARD, A. The fluorescent decay of CsI(Tl) for particles of different ionization density. **Proceedings of the Physical Society**, v. 72, n. 1, p. 1–8, jul 1958. ISSN 0370-1328. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/0168-9002\(92\)90367-Dhttp://stacks.iop.org/0370-1328/72/i=1/a=302?key=crossref.4da2044e44270b1f16bb41a71ec753eb](http://dx.doi.org/10.1016/0168-9002(92)90367-Dhttp://stacks.iop.org/0370-1328/72/i=1/a=302?key=crossref.4da2044e44270b1f16bb41a71ec753eb)>. 78

STRATTON, J. M.; HARVEY, R. J.; HEYLER, G. A. Mission overview for the Radiation Belt Storm Probes Mission. **Space Science Reviews**, v. 179, n. 1-4, p. 29–57, nov 2013. ISSN 0038-6308. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s11214-012-9933-x>>. 10

SUFFERT, M. Silicon photodiode readout of scintillators and associated electronics. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, v. 322, n. 3, p. 523–528, nov 1992. ISSN 01689002. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/016890029291226Y>>. 77

TOORIAN, A.; DIAZ, K.; LEE, S. The CubeSat approach to space access. **IEEE Aerospace Conference Proceedings**, v. 1, n. 1, 2008. ISSN 1095323X. 5, 17

USOSKIN, I. G. A history of solar activity over millennia. **Living Reviews in Solar Physics**, v. 14, n. 1, p. 3, dec 2017. ISSN 2367-3648. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s41116-017-0006-9>>. 31

VAINIO, R.; DESORGHIER, L.; HEYNDERICKX, D.; STORINI, M.; FLÜCKIGER, E.; HORNE, R. B.; KOVALTISOV, G. A.; KUDELA, K.; LAURENZA, M.; MCKENNA-LAWLOR, S.; ROTHKAEHL, H.; USOSKIN, I. G. Dynamics of the Earth's particle radiation environment. **Space Science Reviews**, v. 147, n. 3-4, p. 187–231, nov 2009. ISSN 0038-6308. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s11214-009-9496-7>>. 12, 13

VALENTINE, J.; WEHE, D.; KNOLL, G.; MOSS, C. Temperature dependence of absolute CsI(Tl) scintillation yield. In: NUCLEAR SCIENCE SYMPOSIUM AND MEDICAL IMAGING CONFERENCE, 1991, Santa Fe, NM, USA, USA. **Proceedings...** Santa Fe: IEEE, 1991. p. 176–182. ISBN 0-7803-0513-2. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/258897/>>. 80, 81, 82, 83

VIOLET, M.; LYNCH, K.; REDUS, R.; RIEHL, K.; BOUGHAN, E.; HEIN, C. Proton telescope (PROTEL) on the CRRES spacecraft. **IEEE Transactions on Nuclear Science**, v. 40, n. 2, p. 242–245, apr 1993. ISSN 00189499. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/212348/>>. 62, 63

VISCIO, M. A.; VIOLA, N.; CORPINO, S.; STESINA, F.; FINESCHI, S.; FUMENTI, F.; CIRCI, C. Interplanetary CubeSats system for space weather evaluations and technology demonstration. **Acta Astronautica**, v. 104, n. 2, p. 516–525, 2014. ISSN 00945765. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.actaastro.2014.06.005>>. 5

WAGNER, A.; TAN, W. P.; CHALUT, K.; CHARITY, R. J.; DAVIN, B.; LAROCHELLE, Y.; LENNEK, M. D.; LIU, T. X.; LIU, X. D.; LYNCH, W. G.; RAMOS, A. M.; SHOMIN, R.; SOBOTKA, L. G.; De Souza, R. T.; TSANG, M. B.; VERDE, G.; XU, H. S. Energy resolution and energy-light response of

CsI(Tl) scintillators for charged particle detection. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment**, v. 456, n. 3, p. 290–299, 2001. ISSN 01689002. 77

WALT, M. **Introduction to geomagnetically trapped radiation**. Cambridge: Cambridge University Press, 1994. 192 p. ISSN 0096-3941. ISBN 9780511524981.

Disponível em:

<<http://books.google.com/books?id=erdJ--Fca3UC{&}pgis=1http://ebooks.cambridge.org/ref/id/CB09780511524981>>. 26, 27, 55, 56

WOELLERT, K.; EHRENFREUND, P.; RICCO, A. J.; HERTZFELD, H. Cubesats: cost-effective science and technology platforms for emerging and developing nations. **Advances in Space Research**, v. 47, n. 4, p. 663–684, 2011. ISSN 02731177. Disponível em:

<<http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2010.10.009>>. 5, 17

WOMACK, E. A.; LAZARUS, A. J.; JOSEPH, M. The fluorescent decay of CsI(Tl) excited by charged particles. **IEEE Transactions on Nuclear Science**, v. 11, n. 3, p. 24–26, 1964. ISSN 0018-9499. Disponível em:

<<http://ieeexplore.ieee.org/document/4323400/>>. 77, 78

ZHAO, X.-Y.; WANG, H.-Y.; WU, F.; MENG, X.-C.; MA, Y.-Q.; LU, H.; WANG, H.; WANG, P.; LI, X.-Q.; XU, Y.-B.; SHI, F.; JIANG, W.-Q.; AN, Z.-H.; YU, X.-X.; LIU, H.-Y. A geometric factor calculation method based on the isotropic flux assumption. **Chinese Physics C**, v. 37, n. 12, p. 126201, dec 2013. ISSN 1674-1137. Disponível em: <<http://stacks.iop.org/1674-1137/37/i=12/a=126201?key=crossref.a9d6ac729470880218b4284356b880e3>>. 26