



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

sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/03.13.16.08-TDI

## **ESTUDO DO DECRÉSCIMO NO FLUXO DE ELÉTRONS DO CINTURÃO DE RADIAÇÃO DE VAN ALLEN SOB INFLUÊNCIA DE ICMES**

Vinícius Deggeroni

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre, orientada pelos Drs. Marlos Rockenbach da Silva, e Nelson Jorge Schuch, aprovada em 08 de março de 2019.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3STB2S5>>

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:**

Dr. 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/2019/03.13.16.08-TDI

## **ESTUDO DO DECRÉSCIMO NO FLUXO DE ELÉTRONS DO CINTURÃO DE RADIAÇÃO DE VAN ALLEN SOB INFLUÊNCIA DE ICMES**

Vinícius Deggeroni

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre, orientada pelos Drs. Marlos Rockenbach da Silva, e Nelson Jorge Schuch, aprovada em 08 de março de 2019.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3STB2S5>>

INPE  
São José dos Campos  
2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Deggeroni, Vinícius.

D363e Estudo do decréscimo no fluxo de elétrons do cinturão de radiação de Van Allen sob influência de ICMEs / Vinícius Deggeroni. – São José dos Campos : INPE, 2019.  
xvi + 113 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/03.13.16.08-TDI)

Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2019.

Orientadores : Drs. Marlos Rockenbach da Silva, e Nelson Jorge Schuch.

1. Cinturão de radiação de Van Allen. 2. Dropout. 3. Fluxo de elétrons relativísticos. 4. Van Allen Probes. 5. Ejeções de massa coronais interplanetárias. I. Título.

CDU 550.3

---



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): **Vinicius Deggeroni**

Título: "ESTUDO DO DECRÉSCIMO NO FLUXO DE ELÉTRONS DO CINTURÃO DE RADIAÇÃO DE VAN ALLEN SOB INFLUÊNCIA DE ICMES"

Aprovado (a) pela Banca Examinadora em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de **Mestre** em **Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre**

Dr. **Marcelo Magalhães Fares Saba**

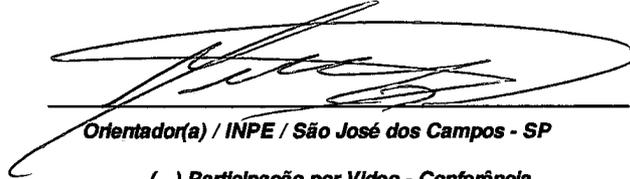


Presidente / INPE / SJCampos - SP

( ) Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado ( ) Reprovado

Dr. **Marlos Rockenbach da Silva**



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

( ) Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado ( ) Reprovado

Dr. **Nelson Jorge Schuch**



Orientador(a) / INPE / Santa Maria - RS

Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado ( ) Reprovado

Dra. **Lígia Alves da Silva**



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

( ) Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado ( ) Reprovado

**Este trabalho foi aprovado por:**

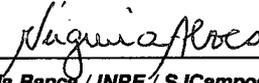
( ) maioria simples

( ) unanimidade

São José dos Campos, 08 de março de 2019

Aprovado (a) pela Banca Examinadora  
em cumprimento ao requisito exigido para  
obtenção do Título de **Mestre** em  
**Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente  
Solar-Terrestre**

Dra. Maria Virginia Alves



Membro da Banca / INPE / SJCampos - SP

( ) Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado ( ) Reprovado

Dra. Flávia Reis Cardoso Rojas



Convidado(a) / EEL - USP / Lorena - SP

( ) Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado ( ) Reprovado

**Este trabalho foi aprovado por:**

( ) maioria simples

unanimidade

São José dos Campos, 08 de março de 2019

## AGRADECIMENTOS

A minha mãe Malvina Deggeroni, irma Clarissa Deggeroni e tia Salete Aparecida de Geroni, pelo apoio incondicional e incentivo sempre prestado na realização dos meus sonhos;

Agradeço a todas as pessoas que me ajudaram a vencer mais esta etapa da vida.

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), pela bolsa de estudos e auxílio financeiro que possibilitou a dedicação integral ao programa de pós-graduação e a operacionalização do estudo;

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) pela oportunidade de estudos e utilização de suas instalações.

Aos Drs. Marlos Rockenbach da Silva e Nelson Jorge Schuch, ao trabalho de orientação a longo prazo, desde na iniciação científica, abrindo o caminho para minha jornada pelo mundo da ciência.

À Dra. Ligia Alves da Silva em especial pelos conselhos, dicas, ideias, correções e toda proatividade empregada em ajudar na realização do trabalho.

Aos pesquisadores e professores do INPE, os quais contribuíram muito para meu aprendizado nesses anos, especialmente à todo grupo de pesquisa do Radiation Belts.



## RESUMO

O objetivo geral deste trabalho é estudar o comportamento do fluxo de elétrons do cinturão de radiação de Van Allen, sob a influência de Ejeções de Massa Coronal Interplanetárias - ICMEs. São utilizados dados do instrumento RBSP-ECT– *Radiation Belt Storm Probes – Energetic Particles Composition & Thermal Plasma Suite*, das duas sondas gêmeas da missão Van Allen *Probes*, que medem o fluxo de elétrons do cinturão de radiação. Para quantizar a intensidade das estruturas causadoras das tempestades foram utilizados dados do índice Dst - *Disturbance Storm Time*, e os parâmetros do Vento Solar, tais como: densidade, temperatura, velocidade e campo magnético, medidos in situ, pelos satélites ACE - *Advanced Composition Explorer* e DSCOVR - *Deep Space Climate Observatory*. A investigação desses dados visa entender os fenômenos físicos que causam variações no fluxo de elétrons, com o foco na perda de elétrons do cinturão, fenômeno conhecido por *dropouts*. Para todo o intervalo de tempo de Agosto de 2012 a Dezembro de 2016 foram selecionados apenas eventos com presença de ICMEs, que por sua vez foram classificados quanto às variações observacionais no cinturão de radiação e quanto ao tipo e presença de nuvem magnética geradora do distúrbio. Para cada classe estudada foi usando o método de análise de época superposta, visando assim relacionar estatisticamente eventos distintos em meios distintos. O estudo de caso para dois eventos, classificados quanto ao tipo de recuperação no cinturão de radiação mostrou que a componente  $B_z$  do campo magnético interplanetário tem relação com a variabilidade na população das partículas no cinturão externo, para as duas classes estudadas. Foi também constatada a variabilidade nos elétrons relativísticos, em todas as classes através do método de análise de época superposta empregado. Foi encontrado um padrão de resposta da análise de época superposta no cinturão de radiação, em que a dinâmica de elétrons relativísticos para o cinturão externo tem relação com as variações observadas na componente  $B_z$  do campo interplanetário quando negativo, principalmente para a separação de classes quanto ao tipo de nuvem. Além disso, esse estudo concluiu que eventos com assinaturas de alta variação no fluxo de elétrons no cinturão externo, foram encontrados para períodos de maior geo-efetividade e que ICMEs contendo nuvens magnéticas tem maior propensão em causar *dropout*.

Palavras-chave: Cinturão de Radiação de Van Allen. Dropout. Fluxo de Elétrons Relativísticos. Van Allen *Probes*. Ejeções de Massa Coronais Interplanetárias.



# STUDY OF THE DECREASE IN VAN ALLEN RADIATION BELT ELECTROLYSTEM FLOW UNDER ICME INFLUENCE

## ABSTRACT

The general objective of this work is to study the behavior of the electron flux of the Van Allen radiation belt under the influence of Interplanetary Coronal Mass Ejections (ICMEs). Data from the RBSP-ECT-Radiation Belt Storm Probes (Energetic Particles Composition Thermal Plasma Suite), from the two twin probes of the Van Allen *Probes* mission, located in the radiation belt, are used. To quantify the intensity of the storm-causing structures, the Dst-Disturbance Storm Time index will be used, and the solar wind parameters density, temperature, velocity and magnetic field, as measured by ACE satellites - Advanced Composition Explorer and DSCOVR - Deep Space Climate Observatory. The investigation of these data aims to understand the physical phenomena that cause variations in the flow of electrons, such as the focus on dropouts, loss of electrons from the belt. For the entire time period from August 2012 to December 2016, only events with presence of ICMEs were selected, which in turn were classified for the observational variations in the radiation belt and the type and presence of magnetic cloud generating the disturbance. For each class studied was using the method of analysis of overlapping time, in order to relate statistically different events in different media. The case study for two events, classified according to the type of recovery in the radiation belt, showed that the  $B_z$  component of the interplanetary magnetic field is related to the variability in the population of the particles in the outer belt, for the two classes studied. Variability was also observed in relativistic electrons, in all classes through the method of superimposed time analysis employed. It was found a response pattern of the superimposed time analysis in the radiation belt, in which the dynamics of relativistic electrons for the outer belt is related to the observed variations in the component  $B_z$  of the interplanetary field when negative, mainly for the separation of classes the type of cloud. In addition, this study concluded that events with signatures of high variation in the electron flow in the outer belt were found for periods of greater geo-effectiveness and that ICMEs containing magnetic clouds are more likely to cause dropout.

Keywords: Van Allen radiation belt. Dropout. Relativistic Electron Flow. Van Allen *Probes*. Interplanetary Coronal Mass Ejections.



## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1.1 Representação simplificada da magnetosfera . . . . .	3
1.2 Ilustração simplificada parâmetro L . . . . .	5
1.3 B-L sistema de coordenadas . . . . .	6
1.4 Órbita da sonda Van Allen - A, em coordenadas L e L-star . . . . .	8
1.5 Sistema de coordenadas GSM e GSE . . . . .	9
1.6 Ilustração dos cinturões de radiação interno e externo de Van Allen . . . . .	10
1.7 Ilustração dos movimentos de partículas confinadas no campo magnético da Terra . . . . .	12
1.8 Cone de perda . . . . .	17
1.9 Dados do meio interplanetário . . . . .	20
1.10 Dropout cinturão . . . . .	21
1.11 Ilustração do campo magnético de uma Nuvem Magnética . . . . .	23
1.12 Nuvem Magnética regiões . . . . .	24
4.1 Período com dropout . . . . .	35
4.2 Período sem dropout . . . . .	36
4.3 Exemplo de dados para uma nuvem magnética, N-S (componente Bz girando de Norte a Sul) . . . . .	38
4.4 Exemplo de dados para uma nuvem magnética, S-N (Bz componente que gira do Sul para o Norte) . . . . .	39
4.5 Exemplo de dados para uma nuvem magnética, Y-S (componente girando de Leste a Oeste ou Oeste a Leste, com o componente Bz na direção Sul) . . . . .	41
4.6 Exemplo: recuperação rápida . . . . .	45
4.7 Exemplo: recuperação lenta . . . . .	47
4.8 Exemplo: evento complexo . . . . .	49
4.9 Exemplo: evento complexo . . . . .	50
4.10 Mapa posição geográfica MSTK . . . . .	51
4.11 Representação da atividade de onda ULF, para tempestade do dia 07 de janeiro de 2015 . . . . .	52
4.12 Exemplo aplicação do método de análise de época superposta . . . . .	55
4.13 Órbita e população de partículas para o intervalo de 5 e 5,5 $L_{star}$ . . . . .	56
4.14 Órbita e população de partículas para o intervalo 4,5 e 4,6 $L_{star}$ . . . . .	57
4.15 Análise de época pontual cinturão de radiação . . . . .	58
4.16 Análise de época e interpolação de dados . . . . .	59

5.1	Gráfico que quantifica a ocorrência de dropout para todos eventos estudados. . . . .	61
5.2	Histograma índice Dst, eventos com <i>dropout</i> e sem <i>dropout</i> . . . . .	66
5.3	Análise de época superposta, para eventos sem <i>dropout</i> . . . . .	67
5.4	Análise de época superposta, para eventos com <i>dropout</i> . . . . .	68
5.5	Gráfico referente à classificação quanto ao tipo de nuvem magnética e ocorrência de <i>dropout</i> . . . . .	70
5.6	Análise de época superposta, para eventos com <i>dropout</i> e sem nuvem. . .	72
5.7	Análise de época superposta, para eventos com <i>dropout</i> classificados com Nuvem N-S. . . . .	74
5.8	Análise de época superposta, para eventos com <i>dropout</i> classificados com Nuvem S-N. . . . .	76
5.9	Análise de época superposta, para eventos com <i>dropout</i> classificados com Nuvem Y-S. . . . .	78
5.10	Diagrama esquemático da classificação das ICMEs com <i>dropout</i> , de acordo com o tipo de recuperação. . . . .	80
5.11	Gráfico referente ao tipo de recuperação no cinturão e ocorrência de <i>dropout</i> . .	81
5.12	Análise de época superposta, para os eventos RR. . . . .	85
5.13	Análise de época superposta, RL. . . . .	87
5.14	Análise de época superposta, EC. . . . .	89
6.1	Fluxo de elétrons do Cinturão de Van Allen e parâmetros do meio interplanetário, do evento ocorrido no dia 17 de março de 2013. . . . .	93
6.2	Representação da atividade de onda ULF, para tempestade do dia 17 de março de 2013. . . . .	95
6.3	Órbita das sondas Van Allen probes, para o dia 17 de janeiro de 2013 . .	96
6.4	Parâmetros do meio interplanetário e cinturão de radiação, para ICME do dia 12 de setembro de 2014. . . . .	97
6.5	Representação atividade de onda ULF, para tempestade do dia 12 de setembro de 2014. . . . .	99
6.6	Órbita das sondas Van Allen probes, para tempestade do dia 12 de setembro de 2014 . . . . .	100

## LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
4.1 Todos eventos estudados . . . . .	31
4.2 Critério de Classificação da análise gráfica . . . . .	43
4.3 Critério de Classificação da análise gráfica para dropout ocorrido no dia 22 de junho de 2015 . . . . .	46
4.4 Critério de Classificação da análise gráfica para dropout ocorrido no dia 12 de setembro de 2014 . . . . .	48
4.5 Locais e medições por posição do magnetômetro MSTK . . . . .	52
5.1 Tabela eventos classificados sem dropout. . . . .	62
5.2 Tabela eventos classificados com <i>dropout</i> . . . . .	64
5.3 Média índice Dst, eventos com <i>dropout</i> e sem <i>dropout</i> . . . . .	66
5.4 Tabela Eventos com <i>dropout</i> e Recuperação Rápida - RR . . . . .	82
5.5 Tabela dos eventos com <i>dropout</i> e Recuperação Lenta - RL . . . . .	83
5.6 Tabela de eventos com <i>dropout</i> , complexos - EC . . . . .	84



## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> . . . . .	<b>1</b>
1.1 Sol e o Meio Interplanetário . . . . .	2
1.2 O Campo Geomagnético . . . . .	3
1.3 Coordenadas GSM e GSE . . . . .	8
1.4 Cinturões de Radiação de Van Allen . . . . .	9
1.4.1 Movimentos . . . . .	11
1.4.2 Invariantes Adiabáticos . . . . .	12
1.4.2.1 Momento magnético $\mu$ . . . . .	13
1.4.2.2 Invariante Longitudinal . . . . .	13
1.4.2.3 Fluxo invariante . . . . .	13
1.4.2.4 Violação dos invariantes . . . . .	14
1.4.3 <i>Pitch Angle</i> . . . . .	14
1.4.4 Cone de Perdas . . . . .	16
1.5 Variabilidade dos Elétrons no Cinturão Externo . . . . .	17
1.5.1 Compressão da Magnetosfera . . . . .	17
1.5.2 Dropout . . . . .	20
1.6 Nuvens Magnéticas . . . . .	22
<b>2 OBJETIVO E DESCRIÇÃO DO TRABALHO</b> . . . . .	<b>25</b>
2.1 Objetivo Geral . . . . .	25
2.2 Objetivo Específicos . . . . .	25
2.2.1 Obtenção e Tratamento de Dados . . . . .	25
<b>3 MOTIVAÇÃO</b> . . . . .	<b>27</b>
<b>4 DADOS E METODOLOGIA</b> . . . . .	<b>29</b>
4.1 Descrição e Escolha dos Instrumentos . . . . .	29
4.2 Metodologia para análise dos eventos . . . . .	30
4.3 Critérios de classificação . . . . .	34
4.3.1 Classificação dropout . . . . .	34
4.3.2 Classificação Tipo de Nuvem Magnética . . . . .	37
4.4 Critério de Categorização Dropout . . . . .	42
4.5 Interpretação gráfica de ondas ULF . . . . .	51

4.6	Ferramentas Estatísticas de Análise . . . . .	53
<b>5</b>	<b>RESULTADOS . . . . .</b>	<b>61</b>
5.1	Dropout . . . . .	61
5.2	Nuvem Magnéticas . . . . .	69
5.3	Recuperação <i>dropout</i> . . . . .	79
<b>6</b>	<b>ESTUDOS DE CASO . . . . .</b>	<b>91</b>
6.1	Caso de Recuperação Rápida: evento do dia 17 de março de 2013 . . . . .	92
6.2	Caso de Recuperação Lenta: evento do dia 12 de setembro de 2014 . . . . .	96
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO . . . . .</b>	<b>101</b>
<b>8</b>	<b>TRABALHOS FUTUROS . . . . .</b>	<b>105</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS . . . . .</b>	<b>107</b>

# 1 INTRODUÇÃO

É de grande interesse na área espacial o estudo da variabilidade do fluxo de partículas nos cinturões de Van Allen. Tal região leva o nome em homenagem ao pesquisador James Van Allen (1959), um dos líderes da missão espacial que a descobriu. Por meio de dados obtidos através dos satélites Explore I e II, Van Allen constata que partículas carregadas de alta intensidade ocupam uma vasta região ao redor da Terra, onde essas mantêm-se temporariamente confinadas no campo geomagnético (ALLEN; FRANK, 1959).

Essa concentração de partículas na região entre 1 e 2 raios terrestres comprovada através dos experimentos realizados pelos satélites Explore I e II é predominantemente povoada de prótons com energias entre 100 keV e algumas centenas de MeV. Ainda notou-se nos experimentos que havia uma segunda camada de partículas entre 3 e 6 raios terrestres, composta preferencialmente de elétrons de altas energias, variando de dezenas de keV a algumas dezenas de MeV (HARGREAVES, 1992; BAKER, 2001). A dinâmica da magnetosfera interna e geometria do campo magnético terrestre proporciona o aprisionamento de partículas carregadas, com diferentes níveis de energia (keV a MeV), formando assim os cinturões.

O entendimento dos processos físicos e dinâmicos envolvidos durante a ocorrência de variabilidade na região vem sendo aprofundado desde então, assim como seus impactos na atmosfera neutra e ionizada. Avanços no estudo e descrição da região com outras abordagens foram evoluindo, como o de Baker (2001) o qual aborda o tema dos cinturões como uma região que obedece uma distribuição aproximadamente anisotrópica, apresentando uma densidade de partículas estatisticamente distribuídas, onde a ocupação da densidade de partículas depende do comportamento da magnetosfera, além de diversas influências externas.

A complexidade e descrição dos movimentos das partículas na região faz se aprofundar cada vez mais no assunto como o estudo da variação do cinturão frente a perturbações, como por exemplo a chegada sucessiva de dois choques interplanetários na magnetosfera terrestre, causando distúrbios e deixando diferentes consequências para a faixa de radiação, externa do cinturão de radiação.

Conhecer a dinâmica de partículas, nesta região, tanto as que estão aprisionadas nos Cinturões de Radiação, quanto as que penetram no campo geomagnético nos eventos de tempestades geomagnéticas, é de grande valia para área das ciências espaciais, uma vez que o estudo visa relacionar os parâmetros do meio interplanetário com

regiões internas da magnetosfera terrestre, estudo pouco explorado.

## 1.1 Sol e o Meio Interplanetário

Devido à fotosfera solar ter um campo aproximadamente dipolar e instável, além do fato do vento solar ser altamente condutor e ser transportado a grandes distâncias com o campo magnético solar IMF - Interplanetary Magnetic Field (PNEUMAN; KOPP, 1970), perturbações nesse meio geram ondas. O comportamento dinâmico do Sol eventualmente ejeta material no espaço interplanetário, em superposição ao vento solar, munido de campo magnético que perturba o meio, bem como seu entorno, e pode atingir a magnetosfera da Terra.

Nesse cenário, o campo magnético da Terra sofre perturbações, seja pela própria estrutura ejetada pelo Sol ou pela onda de choque por ela gerada. Essa interação dos campos magnéticos interplanetário e terrestre eventualmente permite que partículas do vento solar entrem no campo geomagnético causando uma série de fenômenos geofísicos (KAMIDE et al., 1998; ROEDERER; ZHANG, 2016).

Gonzalez et al. (1994) concluíram que as perturbações no campo geomagnético causadas majoritariamente por ICMEs, com componente do IMF direcionada para sul, podem causar tempestades geomagnéticas, cuja classificação é feita de acordo com o índice Dst (Disturbance Storm Time), e como consequência podem acarretar problemas sérios nos sistemas tecnológicos.

O espaço entre os planetas no sistema solar é permeado pela expansão supermagnetossônicas da atmosfera solar, resultando no chamado Vento Solar (BOTHMER; DAGLIS, 2007). O vento solar é composto por um plasma que transporta para fora do Sol o seu campo magnético (PARKS, 1991). Somado ao vento solar, o Sol esporadicamente emite enormes Ejeções de Massa Coronais (“*Coronal Mass Ejections*” – CMEs) que perturbam o Sistema Solar (ROCKENBACH, ) (GONZALEZ et al., 1994). Como essas estruturas são mais rápidas que a velocidade magnetossônicas do plasma local, ondas de choque são formadas, sendo observadas como variações bruscas nos parâmetros de plasma do vento solar e do campo magnético (STERN; NESS, 1982). Devido à Terra ter um campo magnético intrínseco e praticamente dipolar, é formado um escudo protetor chamado magnetosfera (ECHER, 2010), e a fronteira que separa o IMF da Magnetosfera é chamada de Magnetopausa. A geometria da magnetosfera é determinada pela pressão do vento solar aplicada sobre este campo e o arraste sobre linhas de campo, o que explica seu formato comprimido no lado direcionado para o Sol e alongado na parte noturna como ilustra a Figura 1.1

(KIVELSON; RUSSELL, 1995).

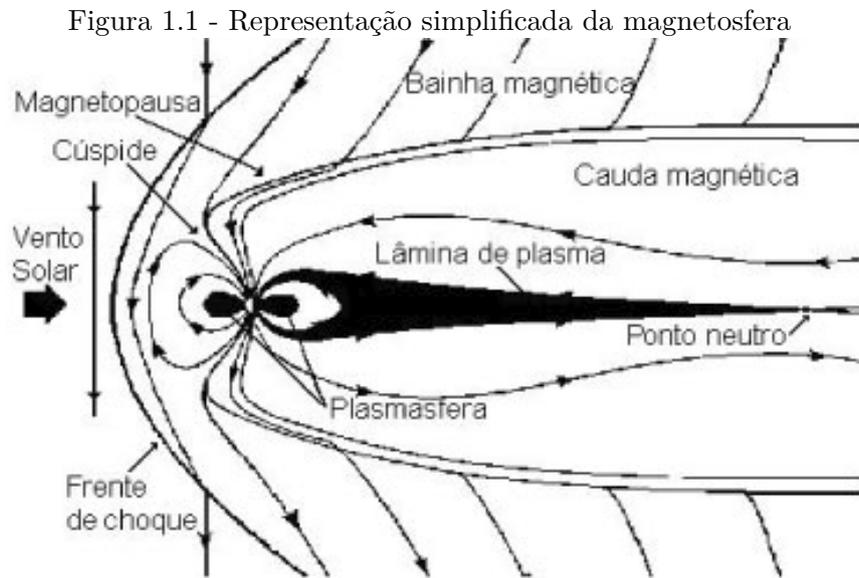


Ilustração artística da magnetosfera e denominações de regiões mais conhecidas.

Fonte: adaptado de COSTA JÚNIOR et al. (2011)

Mesmo com toda essa proteção, partículas energéticas adentram a magnetosfera em sua maioria pelos polos magnéticos. O movimento das partículas apresentam um comportamento padrão, sua órbita e trajetória dependem da sua energia e momento, assim podendo ficar aprisionadas ou precipitarem (ECHER, 2010).

A precipitação que ocorre nos polos pode ser visível a olho nu, vista na forma de uma cortina multicolor com um espectro de coloração que vai do lilás ao vermelho, tal fenômeno conhecido como Aurora (BROWN, 1966). Já as partículas que adentram e são aprisionadas incorporam-se ao cinturão de radiação de Van Allen.

## 1.2 O Campo Geomagnético

O campo magnético terrestre ou campo geomagnético em uma posição  $r$  e em um instante de tempo  $t$  pode ser representado matematicamente por:

$$\vec{B}(r, t) = \vec{B}_{cp}(r, t) + \vec{B}_{cc}(r) + \vec{B}_{ci}(r, t), \quad (1.1)$$

onde  $\vec{B}(r, t)$  é o vetor campo magnético na posição  $r$  no instante de tempo  $t$ , originado pelos três componentes: campo principal  $\vec{B}_{cp}(r, t)$ , campo crustal  $\vec{B}_{cc}(r)$  e o campo induzido por correntes  $\vec{B}_{ci}(r, t)$ , (MCLEAN et al., 2004).

- **Campo principal:** é o componente dominante do campo magnético terrestre, responsável por mais de 96 % da sua intensidade, é explicado pelo modelo de dínamo, onde um fluido condutor em rotação e convecção origina e mantém um campo magnético.
- **Campo crustal:** se dá por meio da magnetização intrínseca do solo e rochas ou diferença de potencial eletrostático entre terrenos e relevos terrestres. Não variam no tempo.
- **Campo induzido por correntes:** é devido a correntes que circulam na ionosfera e magnetosfera, incluindo correntes elétricas na crosta, variando no tempo.

Uma boa aproximação para representar o campo geomagnético é usando a solução de um campo dipolar, com o eixo de dipolo deslocado aproximadamente  $11,5^\circ$  do eixo de rotação da Terra (ROEDERER; ZHANG, 2016) (MCLEAN et al., 2004). Pela teoria dipolar, a intensidade do campo magnético da Terra pode ser representada por:

$$\vec{B}(r) = \frac{3(\vec{m} \cdot \vec{r})}{r^5} \vec{r} - \frac{\vec{m}}{r^3}, \quad (1.2)$$

onde  $\vec{m}$  é o momento magnético e  $r = |\vec{r}|$  é a distância radial ao centro da Terra.

A escolha de uma coordenada adequada viabiliza e facilita o entendimento de um problema físico, seja expresso graficamente ou analiticamente. Sabendo que as forças que regem o movimento são as forças de Lorentz, uma coordenada inteligente a se trabalhar na descrição da dinâmica de partículas no cinturão de radiação de Van Allen é a que descreve a geometria do campo geomagnético.

Assim, a generalização da distância equatorial de uma linha de campo até o centro da Terra, de coordenadas como ilustrado pela Figura 1.3, que leva em conta o campo magnético  $\vec{B}$  e o parâmetro L, denominado parâmetro de McIlwain ou parâmetro *Shell*, facilita a descrição do movimento de partículas no campo geomagnético.

Por definição, o cálculo do  $L$  (Equação 1.3) não muda, o que varia é o modelo para  $\vec{B}$  e a geometria que este toma (KNECHT; SHUMAN, 1972; ROEDERER; ZHANG, 2016).

Sendo assim, essa é a melhor coordenada para se tratar do problema de fluxo de partículas no cinturão de radiação de Van Allen.

Como ilustrado na Figura 1.2, o parâmetro  $L$  é a distância em raios terrestres, do centro da Terra até a linha de campo que cruza o plano equatorial e penetra na superfície da Terra com co-latitude  $\vartheta_0$  (PILCHOWSKI et al., 2010).

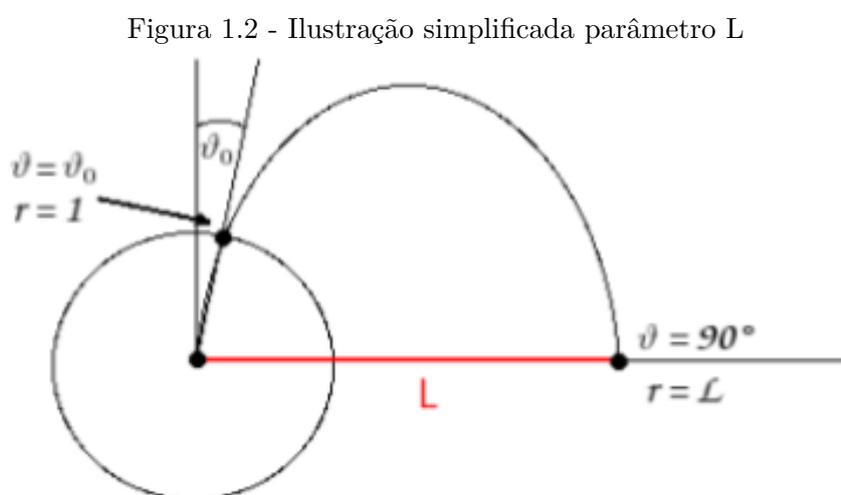


Ilustração geométricas, do parâmetro  $L$ , onde o círculo representa a Terra, a parábola representa uma linha de campo magnético e a linha vermelha entre o centro da Terra e o ponto onde a parábola atravessa o plano equatorial é o parâmetro  $L$ .

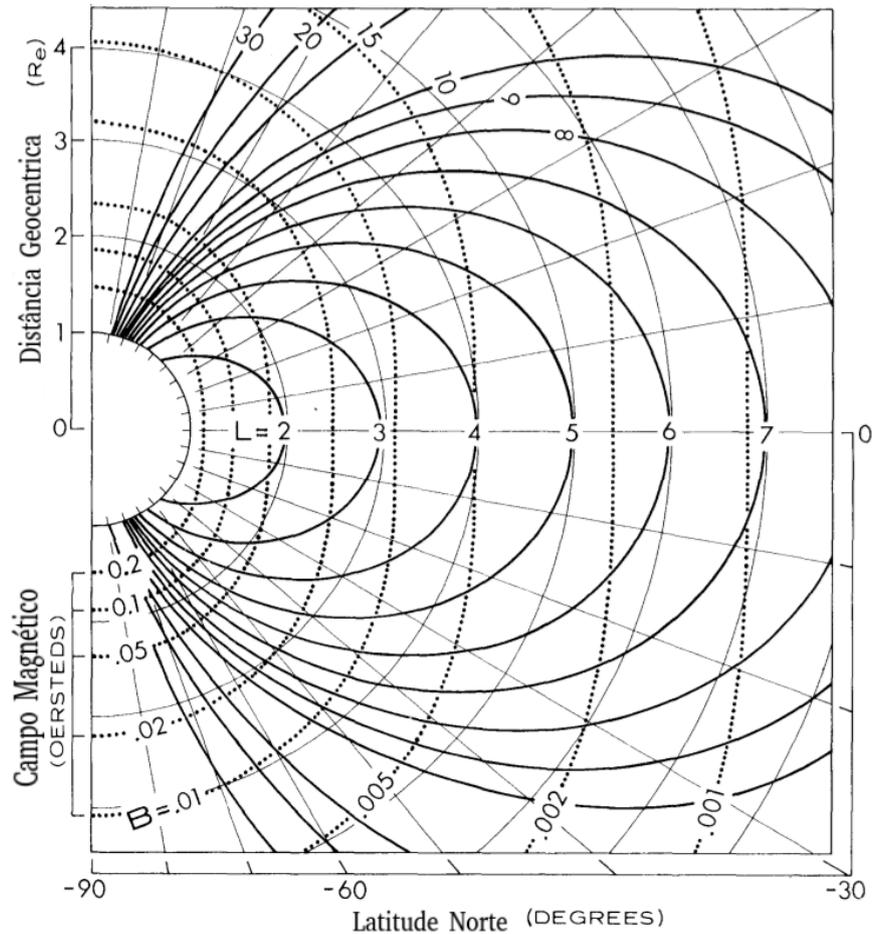
Fonte: adaptado de Pilchowski et al. (2010)

Dada definição, o parâmetro  $L$  deve ser calculado indiretamente por:

$$L = \frac{r_o}{R_E} \frac{1}{\sin^2 \vartheta_0}, \quad (1.3)$$

onde  $r_o$  é a distancia equatorial até a linha de campo, é  $R_E = 6371km$  o raio Terrestre e  $\vartheta_0$  é a co-latitude.

Figura 1.3 - B-L sistema de coordenadas



As linhas cheias indicam  $L$  constantes e as linhas pontilhadas indicam  $B$  constantes.

Fonte: Adaptado de, [Knecht e Shuman \(1972\)](#)

Para o entendimento da dinâmica das partículas na região dos cinturões, deve-se compreender diversos mecanismos físicos que determinam a configuração dos cinturões, usa-se a coordenada denominada de "L-star", que basicamente muda o referencial estático da linha de campo, tornando a coordenada como o caminho descrito pelo centro de giro de uma partícula livre de alterações adiabáticas. Assim L-star é a propriedade de uma partícula, não a de um ponto no espaço ([ROEDERER; LEJOSNE, 2018](#)). Variações adiabáticas no campo mudarão a trajetória da partícula e por consequência a geometria da coordenada. Inteligentemente desta forma variações não adiabáticas, objeto de estudo, tornam-se mais visíveis e quantitativamente mais precisas.

Em um campo dipolar puro, a relação  $\varphi$  - terceiro invariante adiabático e  $L$ :  $\varphi =$

$2\pi \cdot B_E \cdot R_E^2 / L$  é válida. Calculado o valor do terceiro invariante de uma partícula em um determinado ângulo de inclinação em um determinado local e tempo, pode-se considerar a quantidade adiabaticamente invariante e assim chamá-lo de "L-star" da partícula em questão (ROEDERER; LEJOSNE, 2018):

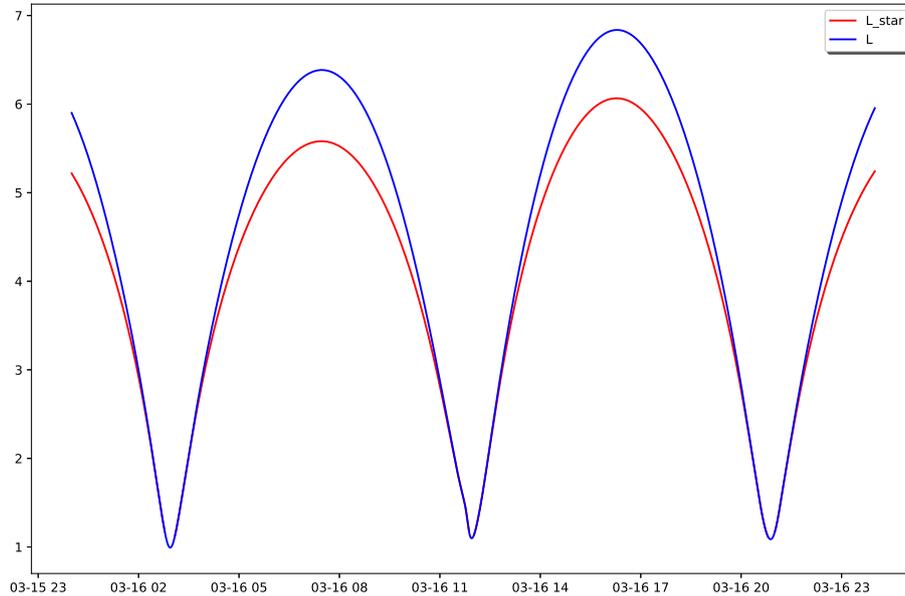
$$L_{star} = \frac{2\pi \cdot B_E \cdot R_E^2}{\varphi} \quad (1.4)$$

Os fatos mais importantes sobre L-star são:

- trata-se de uma propriedade intrínseca de uma partícula aprisionada de forma estável, não de um ponto no espaço.
  
- Em um determinado ponto  $r$  de uma linha de campo, partículas de diferentes ângulos de inclinação  $\alpha$  têm valores L-star diferentes ( $L_{star} = L_{star} * (\alpha)$ ).
  
- Maiores valores são obtidos no lado diurno.

As coordenadas  $L$  e  $_{star}$ , Figura 1.4, onde nota-se expressiva diferença em escala espacial para  $L's > 4$ , justificando a transformação de coordenadas.

Figura 1.4 - Órbita da sonda Van Allen - A, em coordenadas L e L-star



Representação da órbita da sonda Van Allen A, para o intervalo de 24 horas, do dia 16 de março de 2015, expresso em coordenadas L e L-star nas cores azul forte e vermelho, respectivamente.

Fonte: Produção do autor.

### 1.3 Coordenadas GSM e GSE

O sistema de coordenadas GSM (Geocentric Solar Magnetospheric) é muito bem empregado para análises que envolvam o meio interplanetário e estudos da magnetosfera, uma vez que o sistema se referencia pela posição relativa do Sol e Terra, com uma rotação que segue o campo magnético terrestre. A Figura 1.5 representa os dois sistemas de coordenadas mais usados em geofísica espacial, GSM (em azul) e GSE (Geocentric Solar Ecliptic System), em vermelho. Note que o eixo  $X$  é coincidente em ambos sistemas de coordenadas.

O triedro  $(X_{GSM}, Y_{GSM}, Z_{GSM})$  que define o sistema GSM tem como origem o centro da Terra, o eixo  $X_{GSM}$  aponta da Terra para o Sol, o eixo  $Z_{GSM}$  é a projeção do eixo do dipolo magnético terrestre (positivo para o norte) no plano perpendicular ao eixo  $X_{GSM}$  baseado na linha que une o Sol e a Terra, e o eixo  $Y_{GSM}$  é perpendicular

ao plano formado pelos eixos  $X_{GSM}$  e  $Z_{GSM}$ , cujo sentido é definido pela regra da mão direita (HAPGOOD, 1992).

Figura 1.5 - Sistema de coordenadas GSM e GSE

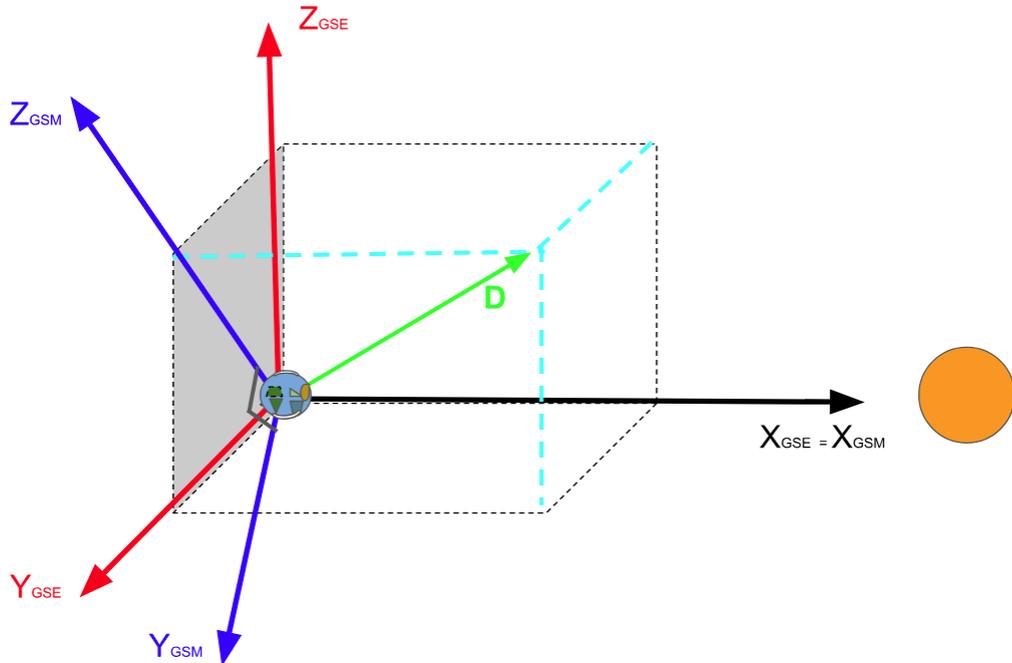


Ilustração artística que relaciona os sistemas de coordenadas GSE e GSM, sendo que  $D$  representa o vetor de dipolo magnético terrestre.

Fonte: Produção do autor.

O sistema GSE está centrado na Terra, com o eixo  $X_{GSE}$  na direção Terra-Sol, o eixo  $Y_{GSE}$  no plano da eclíptica na direção do anoitecer e o eixo  $Z_{GSE}$  está paralelo ao polo da eclíptica. A diferença entre esses dois sistemas de coordenadas ocorre no plano (Y,Z) e é dada pela rotação em torno do eixo X, como no esquema da Figura 1.5.

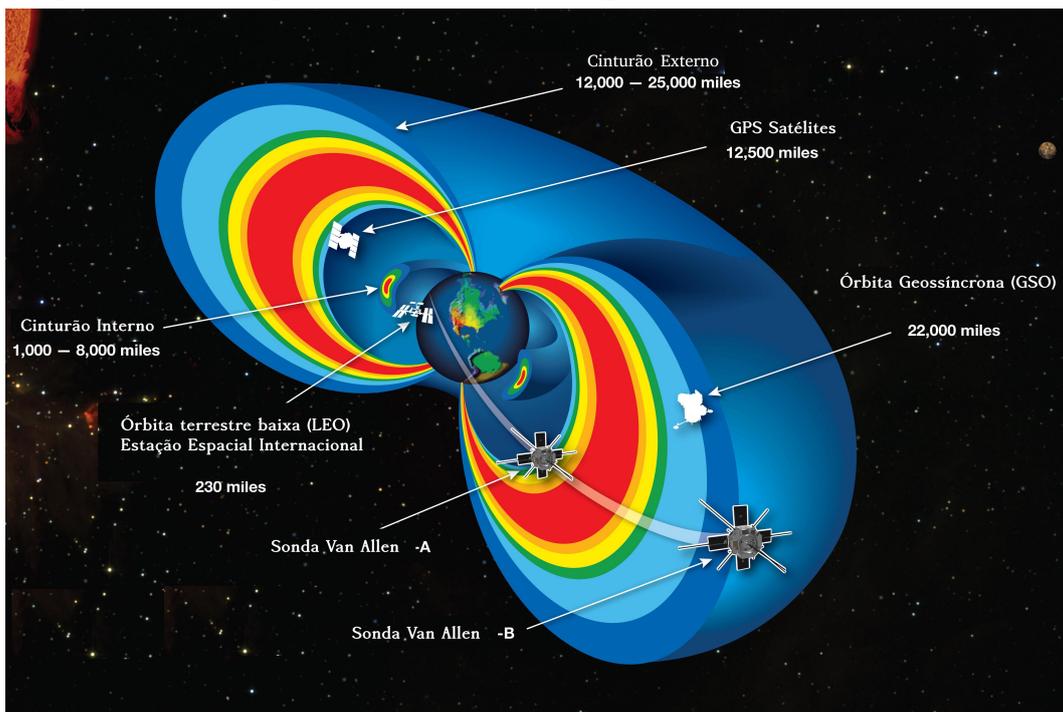
#### 1.4 Cinturões de Radiação de Van Allen

Os Cinturões de Radiação de Van Allen são as regiões onde o movimento das partículas é limitado pelo campo Geomagnético. A topologia dipolar juntamente com a distribuição espacial da intensidade do campo geomagnético, que é caracterizado por linhas do campo magnético que se intensificam em latitudes elevadas nos polos, e um campo magnético mínimo relativo no equador aprisiona as partículas (SPJELDVIK;

ROTHWELL, 1985). Desta forma as partículas que espiralam ao redor das linha de campo, ao chegarem em altas latitudes, se deparam com linhas mais concentradas, portanto com campo magnético mais intenso, o que faz com que a partícula seja refletida. Pizzella et al. (1962) acreditam que a maioria das partículas aprisionadas é de origem do vento Solar. Por esta razão o campo magnético da Terra é capaz de confinar as partículas carregadas.

Investigações com sondas espaciais constataram a existência de regiões em diferentes níveis de altitude com densidades de partículas para vários níveis de energia. Esse local tem o formato de toróides, sendo um interno e outro externo, conhecidos como cinturões de radiação ou cinturões de Van Allen (ALLEN; FRANK, 1959), ilustrado na Figura 1.6.

Figura 1.6 - Ilustração dos cinturões de radiação interno e externo de Van Allen



Representação artística dos cinturões de radiação interno e externo de Van Allen. Também são representadas as posições de alguns tipos de órbitas, tais como de satélites de baixa órbita (LEO), satélites GPS e órbitas geossíncronas, além das Van Allen Probes.

Fonte: Adaptado de Zell (2013).

O cinturão interno é estimado ter de um a dois raios terrestres aproximadamente,

em baixas latitudes, já o externo compreende uma extensão que varia de três até aproximadamente seis raios terrestres no plano equatorial (ALLEN; FRANK, 1959; HARGREAVES, 1992). O cinturão externo é composto principalmente por elétrons de altas energias, variando de dezenas de keV e algumas dezenas de MeV, já o interno tem sua população em grande maioria composta por prótons, com energias entre 100 keV até 100 MeV.

### 1.4.1 Movimentos

A equação do movimento para uma partícula de carga  $q$  é regida pela força de Lorentz (JOHN et al., 1982), que resulta da soma das forças elétricas provenientes de um campo elétrico  $\vec{E}$ , dada por  $\vec{F}_e = q\vec{E}$ , somadas às forças do campo magnético que dependem da carga  $q$  da partícula, de sua velocidade vetorial  $\vec{v}$ , e do campo magnético  $\vec{B}$ , que dá origem à força magnética  $\vec{F}_m = q\vec{v} \times \vec{B}$ .

Desta forma temos a força de Lorentz:

$$\vec{F}_l = \vec{F}_e + \vec{F}_m. \quad (1.5)$$

Ainda pode se levar em conta a atração gravitacional dada por  $m\vec{g}$ , onde  $m$  é a massa da partícula e  $\vec{g}$  a aceleração da gravidade. Somando todas as forças atuantes e reescrevendo as equações na forma diferencial chegamos a uma equação geral que descreve o movimento de uma partícula carregada em relação a um dado referencial (BAUMJOHANN; TREUMANN, 1996):

$$\frac{d}{dt} \left( m \frac{d\vec{r}}{dt} \right) = q \left( \vec{E} + \frac{1}{c} \frac{d\vec{r}}{dt} \times \vec{B} \right) + m\vec{g} \quad (1.6)$$

Sendo:

$\vec{r}$  vetor posição e  $c$  representa a velocidade da luz no meio. Baumjohann e Treumann (2012) dizem que a decomposição do movimento de uma partícula carregada, descrito pela equação 1.6, pode ser interpretada por três movimentos:

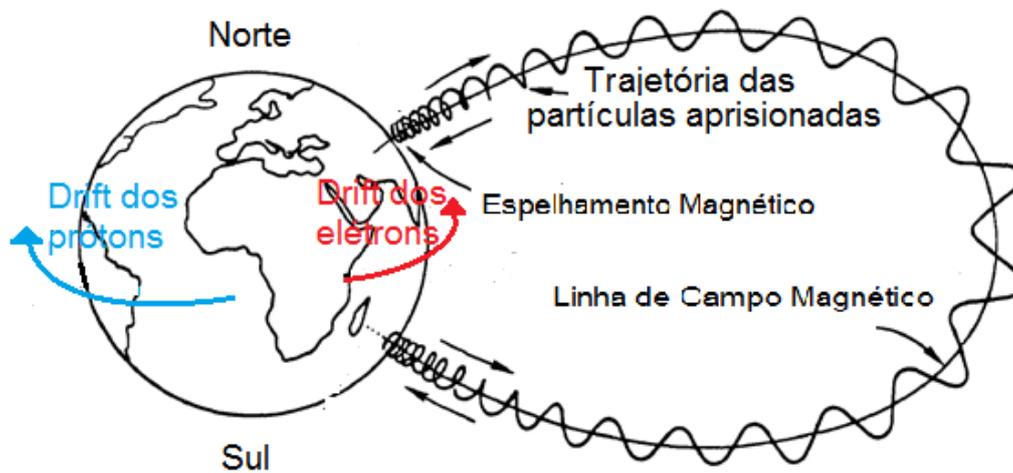
- Movimento de giro da partícula em torno das linhas de campo (movimento ciclotrônico);
- Movimento de ida e volta ao longo de uma linha de campo magnético

(movimento de *bouncing* ou repique);

- Movimento ao longo de uma superfície fechada entorno da Terra, definido pela linhas de campo magnético (movimento de *drift* ou deriva).

Os três movimentos de uma partícula confinada estão sintetizados artisticamente pela Figura 1.7. Em azul, a representação do movimento para os prótons e, em vermelho, para elétrons:

Figura 1.7 - Ilustração dos movimentos de partículas confinadas no campo magnético da Terra



Desenho descritivo dos três tipos de movimento de partículas confinadas no campo magnético da Terra

Fonte: Adaptado de Spjeldvik e Rothwell (1985)

#### 1.4.2 Invariantes Adiabáticos

A descrição do movimento das partículas, devido ao número de interações e forças empregadas na dinâmica do cinturão de radiação, torna-se muito difícil usando a teoria cinética. Por isso usa-se três invariantes adiabáticos, que descrevem muito bem a dinâmica das partículas dentro dos tempos respectivos de interação para cada um deles. Esse tempo de interação da partícula com o campo é fator crucial para que em determinadas situações ocorra a violação dos respectivos invariantes (GOMBOSI, 1998; GURNETT; BHATTACHARJEE, 2017; BAUMJOHANN; TREUMANN, 1996).

### 1.4.2.1 Momento magnético $\mu$

Como o momento magnético não sofre variações significativas, para períodos característicos de uma oscilação do movimento ciclotrônico:

$$\frac{d\mu}{dt} = 0, \quad (1.7)$$

isto significa que a variação do momento magnético no tempo é zero. Conclui-se que:

$$\mu = \text{constante}. \quad (1.8)$$

Na prática, elétrons e íons giram ao redor das linhas de campo magnético em direções opostas, conservando o momento magnético  $\mu$ , primeiro invariante adiabático (BAUMJOHANN; TREUMANN, 1996).

### 1.4.2.2 Invariante Longitudinal

Trata-se do movimento de ir e vir da partícula a longo da linha de campo, indo do Sul magnético para o ponto de espelhamento no Norte magnético, e retornando ao sul, fechando uma oscilação. Note que a escala de tempo é maior que a do primeiro invariante. Matematicamente ele é descrito como:

$$J = \oint P ds = \text{constante} \quad (1.9)$$

onde  $P$  é o momento da partícula ao longo da linha de campo e  $ds$  é o elemento de caminho. O valor da integral  $J$  é constante para todas as oscilações completas. A integral de caminho refere-se a uma oscilação completa da partícula (NUNES, 1982)(GOMBOSI, 1998).

### 1.4.2.3 Fluxo invariante

O terceiro invariante está associado ao movimento de deriva da partícula,  $\varphi$  que é o fluxo total na trajetória em torno da Terra, resultado da topologia do campo magnético e efeito do gradiente das linhas de campo, expresso por:

$$\varphi = \oint \vec{B} \cdot \vec{ds} = \text{constante} \quad (1.10)$$

onde  $\vec{B}$  é o vetor campo magnético e  $\vec{ds}$  é o vetor elemento de área. A integral é estimada sobre toda a superfície fechada descrita pelo centro de giro da partícula, enquanto ela se move em torno da Terra (GOMBOSI, 1998).

#### 1.4.2.4 Violação dos invariantes

Saber quando um invariante é violado é crucial para o estudo da dinâmica de partículas no cinturão de radiação. É bom ressaltar que os três movimentos ocorrem simultaneamente com a partícula aprisionada onde os tempos de oscilação dos movimentos descritos pelos invariantes, em uma escala do menor para o maior é;

$$T_\mu < T_J < T_\varphi.$$

Segundo Baumjohann e Treumann (1996) o tempo de oscilação associado ao primeiro invariante  $\mu$  está na ordem de milissegundos, já o tempo de oscilação associado ao segundo invariante  $J$  em décimos de segundos e o tempo de oscilação do terceiro invariante  $\varphi$  em minutos.

Quando há violação de um invariante adiabático, vários processos dinâmicos importantes, que são capazes de alterar a densidade de fluxo de partículas no cinturão de radiação podem ocorrer. Um dos mecanismos que podem ocorrer é a troca de energia resultante da interação onda-partículas. Devido a estas ondas geradas na magnetosfera possuem períodos compatíveis ao período de movimento das partículas elas interagem trocando energia, e conseqüentemente influenciam na população de partículas da região (ELKINGTON, 2006).

Caso variações magnéticas no campo da Terra ocorram em um tempo muito menor que os tempos de movimento adiabáticos, violações nos invariantes adiabáticos estarão sujeitas a ocorrer, podendo alterar o movimento e energia das partículas do cinturão de radiação, influenciando na densidade de elétrons da região acarretando na diminuição da população de partículas no cinturão de radiação denominado (*dropout*), para casos em que a perda atingir quedas de aproximadamente uma ordem de grandeza, para mais que um nível de energia (ALVES et al., 2016; BORTNIK; THORNE, 2007).

#### 1.4.3 Pitch Angle

Da mesma forma que uma partícula realiza o movimento ciclotrônico entorno da linha de campo, quando sua velocidade apresenta uma componente paralela à essa

linha ela irá se mover ao longo da linha de campo magnético descrevendo uma trajetória em espiral. O *pitch angle* de uma partícula pode ser entendido como o ângulo formado entre a direção da trajetória da partícula e a direção tangencial à linha do campo geomagnético. Esse ângulo varia com a posição da partícula ao longo da linha de campo. O movimento de giro tem associado um período, tempo correspondente a uma volta completa ao redor de uma linha de campo, definido como período ciclotrônio  $T_c$ :

$$T_c = 2\pi \frac{m}{qB}, \quad (1.11)$$

com isso, o raio do círculo descrito no período é definido como raio ciclotrônico  $R_c$ :

$$R_c = \frac{mV_{\perp}}{qB} = \frac{m \sin \alpha}{qB}, \quad (1.12)$$

onde  $V_{\perp}$  é a componente da velocidade na direção perpendicular ao vetor campo magnético  $B$ , e o ângulo entre  $V$  e  $B$  é o ângulo  $\alpha$ , que varia com a posição da partícula ao longo da linha de campo, de modo que a velocidade da partícula pode ser decomposta nas componentes paralela e perpendicular à linha de campo. Pelo primeiro invariante adiabático temos:

$$\mu_m = \frac{mV_{\perp}^2}{2B}, \quad (1.13)$$

$\mu_m$  é o momento magnético e assim, devido ao momento magnético ser constante e a energia cinética da partícula, obtém-se (BAUMJOHANN; TREUMANN, 1996; ROEDERER; ZHANG, 2016):

$$\frac{\sin^2 \alpha}{B} = \text{constante}, \quad (1.14)$$

em que  $\alpha$  é o *pitch angle*. Com uma breve análise da equação 1.14, notamos que o aumento de  $B$  deve-se ter uma diminuição em  $\sin^2 \alpha$  e, vice versa, mantendo a razão. Conhecendo a distribuição do campo magnético terrestre e sabendo que, uma partícula que se aproxima dos polos terrestres está sujeita a um campo  $\vec{B}$  que aumenta, acarretando em um aumento no ângulo  $\alpha$  até o que chamamos de ponto de espelhamento, onde  $\alpha = 90^\circ$ . Assim a componente da velocidade paralela a  $\vec{B}$  se

anula e a partícula só tem componente perpendicular, isto é, toda energia cinética está na componente perpendicular, neste ponto ocorre a reflexão da partícula, isto é, a energia cinética da partícula volta à componente longitudinal no sentido contrário a que chegou no ponto de espelhamento (BAUMJOHANN; TREUMANN, 1996; ROEDERER; ZHANG, 2016). Porém, se a partícula tiver muita energia ela pode adentrar as linhas de campo e ser perdida na alta atmosfera.

#### 1.4.4 Cone de Perdas

O cone de perdas é definido a partir do ângulo  $\alpha$  que a trajetória da partícula faz sobre as linhas de campo no equador magnético.

Existe um valor para  $\alpha$  em que a partícula será perdida por ter adentrado muito as linhas de campo, assim ângulos menores que esse terão partículas perdidas nos polos. Define-se cone de perdas, pelo cone formado pelo maior ângulo de perda que a partícula tem sobre o equador magnético, como ilustra a Figura 1.8, (BAUMJOHANN; TREUMANN, 1996). Sendo assim as partículas que tiverem um  $\alpha$  pequeno, terão assim uma grande energia cinética paralela às linhas de campo, o que fará com que cheguem mais próximas da superfície, precipitando na atmosfera Terrestre (BAUMJOHANN; TREUMANN, 1996; ROEDERER; ZHANG, 2016).

Figura 1.8 - Cone de perda

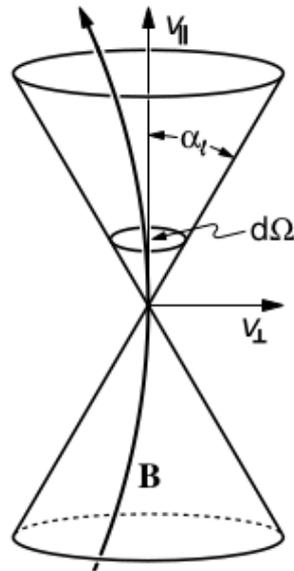


Ilustração do cone de perdas, onde  $V_{||}$  e  $V_{\perp}$  velocidade paralela e velocidade perpendicular da partícula respectivamente,  $B$  campo magnético terrestre,  $d\Omega$  ângulo sólido, o ponto definido é sobre a linha do equador magnético

Fonte: Adaptado de Baumjohann e Treumann (1996).

## 1.5 Variabilidade dos Elétrons no Cinturão Externo

A variação na densidade de fluxo de partículas no cinturão e processos dinâmicos depende da violação de um ou mais invariantes adiabáticos (ELKINGTON, 2006; BORTNIK; THORNE, 2007). Os mecanismos que desencadeiam a quebra nos invariantes podem ser tanto externos à magnetosfera, ou internos (YUMOTO, 1988). Mecanismos externos estão ligados a influencias diretas do meio interplanetário, gerados pelo vento solar e campo magnético interplanetário. Mecanismos internos têm relação com mudanças abruptas e passageiras no ambiente e na energia livre armazenada na magnetosfera terrestre (YUMOTO, 1988). Ambos mecanismos podem interagir com as partículas aprisionadas no cinturão através de ondas.

### 1.5.1 Compressão da Magnetosfera

Uma vez que o campo magnético terrestre aprisiona as partículas do Vento Solar, o conhecimento de sua geometria é de fundamental relevância na análise da dinâmica das partículas dos Cinturões de Radiação. A modulação da magnetosfera

basicamente é regida pelos parâmetros de plasma, como a velocidade dos íons  $V_p$ , a densidade de íons  $N_p$  do vento solar, bem como o campo magnético interplanetário  $B$  (PARKS, 1991; SHUE et al., 1998). Com estes parâmetros pode-se inferir a Pressão dinâmica  $D_p$  do vento solar sobre a magnetosfera terrestre:

$$D_p = (1.96e^{-6}N_p)(V_p)^2. \quad (1.15)$$

Outro parâmetro do plasma,  $\beta = \frac{P_c}{P_m}$ , dado pela razão entre pressão cinética  $P_c$  e pressão magnética  $P_m$ , indica qual pressão predomina sobre a outra (GARY, 2001). Assim, se a pressão magnética é maior que a pressão cinética ( $\beta < 1$ ), caso a pressão cinética predomine ( $\beta > 1$ ), para pressão magnética e cinética em equilíbrio tem-se  $\beta = 1$ . Desta forma:

$$P_c = nkT, \quad (1.16)$$

onde  $n$  é a densidade numérica de ions,  $k$  é a constante de Boltzmann e  $T$ , a temperatura média dos ions.

$$P_m = \frac{B_t^2}{2\mu_0}, \quad (1.17)$$

onde  $B_t$  é o módulo do campo magnético e  $\mu_0$  é a permeabilidade magnética.

De posse destes parâmetros, através do modelo de Shue et al. (1998), o tamanho e a forma da magnetopausa podem ser determinados, através da pressão dinâmica e estática do vento solar e da pressão magnética da magnetosfera (SHUE et al., 1998). Assim a função posição da magnetopausa, é:

$$r = r_0 \left( \frac{2}{1 + \cos \theta} \right)^\alpha, \quad (1.18)$$

onde  $r_0$  é a distância na qual é alcançado o equilíbrio entre pressão dinâmica exercida pelo vento solar e a exercida pelo campo geomagnético na região  $\alpha$  o nível associado à expansão da cauda. O valor de  $r$  é a distância radial do centro do sistema até um ponto na magnetopausa em função do ângulo  $\theta$  calculado por Shue et al. (1997) este modelo encontrou uma expressão que varia conforme a direção preferencial de  $B_z$  dada por:

$$r_0 = \begin{cases} (11,4 + 0,013B_z)(D_p)^{-\frac{1}{6,6}} & , se \quad B_z \geq 0 \\ (11,4 + 0,014B_z)(D_p)^{-\frac{1}{6,6}} & , se \quad B_z < 0, \end{cases}$$

onde  $B_z$  é calculado em nano teslas e  $D_p$  em nano pascal. O modelo inicial de [Shue et al. \(1997\)](#), sofreu melhorias através de manipulações matemáticas e ajustes os quais fornecem uma melhor descrição implícita das leis de conservação física subjacentes e levando a um melhor acordo com as observações [Shue et al. \(1998\)](#).

$r_0$  tornou-se uma expressão dada por:

$$r_0 = \left\{ 10,22 + 1,29 \tan \left[ 0,184(B_z + 8,14) \right] \right\} (D_p)^{-\frac{1}{6,6}}, \quad (1.19)$$

o valor de  $\alpha$  é obtido por:

$$\alpha = \left\{ 0,58 - 0,007B_z \right\} [1 + 0,024 \ln(D_p)], \quad (1.20)$$

No modelo [Shue et al. \(1998\)](#) a magnetopausa é considerada simétrica ao plano  $YZ$ , com isso,  $r$  pode ser decomposto em  $X = r \cos \theta$  e  $R = r \sin \theta$ , onde  $R = (Y^2 + Z^2)^{\frac{1}{2}}$  ([SHUE et al., 1998](#)).

Através de dados obtidos do meio interplanetário os parâmetros representativos de plasma e calcular a compressão da magnetopausa, como no gráfico da figura abaixo, onde foram usados dados obtidos pelo satélite ACE.

Figura 1.9 - Dados do meio interplanetário

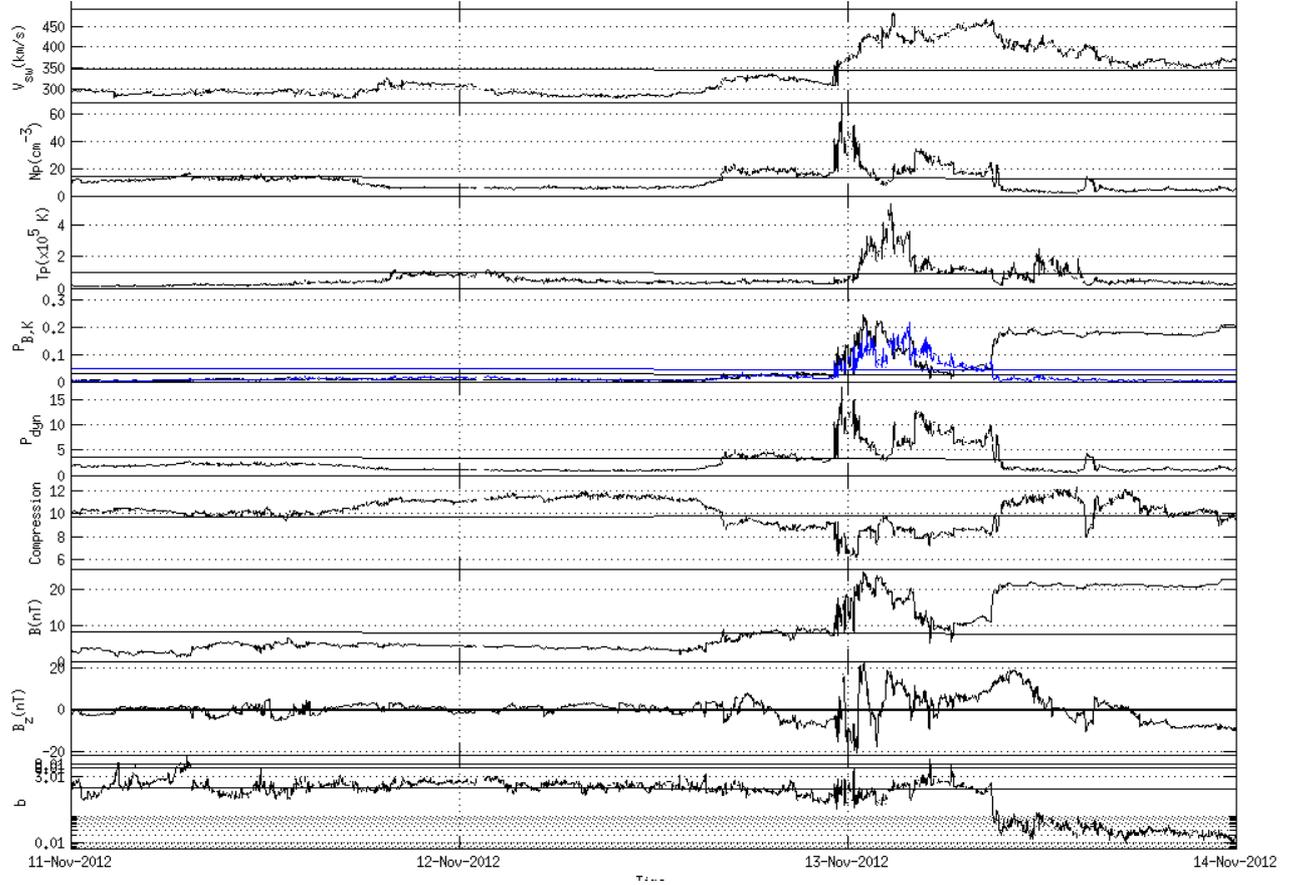


Gráfico temporal para um evento de CME no dia 12 de novembro de 2012, na ordem de cima para baixo tem-se: representação da velocidade do vento solar  $V_{sw}$  em Km/s, densidade de partículas  $N_p$  em  $cm^{-3}$ , temperatura de íons  $T_p$  em K, pressão cinética  $P_k$  e pressão magnética  $P_B$  no mesmo painel onde  $P_k$  está representado em azul e  $P_B$  em preto ambas em  $nPa$ , logo abaixo pressão dinâmica  $P_{dyn}$  em  $nPa$ , em seguida a representação da fronteira, lado diurno da magnetopausa em raios terrestres denominado como *Compression*, seguida do campo magnético interplanetário total  $B$  em  $nT$ , componente  $z$  do campo magnético interplanetário  $B_z$  em  $nT$  e, por último, o parâmetro  $\beta$ .

Fonte: Produção do autor.

### 1.5.2 Dropout

A classificação em eventos com dropout, no cinturão de radiação, consiste segundo Turner et al. (2012) em uma redução no fluxo de partículas marcada pelo menos por um fator de 4 vezes o estágio anterior, por uma queda abrupta na densidade de partículas para vários níveis de energia. A definição do critério, visa eventos onde ocorra

aceleração de partículas devido a processos irreversíveis (não adiabáticos)(TURNER et al., 2012). Essa alteração no fluxo, em uma ordem de grandeza, é ilustrada no gráfico abaixo:

Figura 1.10 - Dropout cinturão

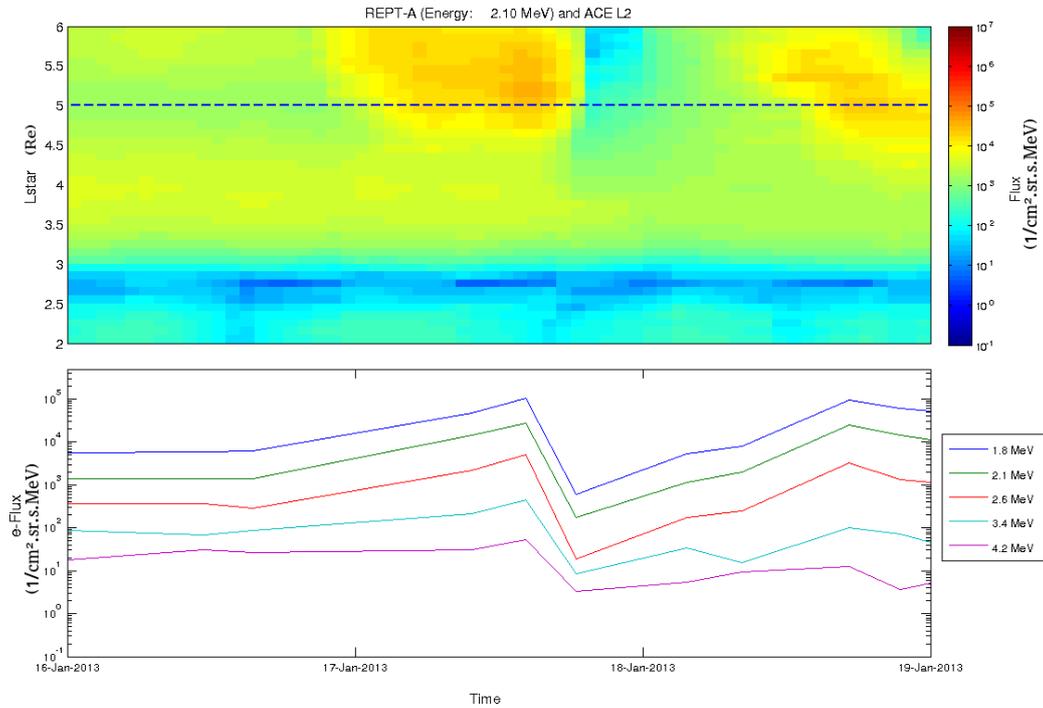


Gráfico temporal para um evento de CME no dia 17 de janeiro de 2013, com representação do fluxo de partículas do cinturão externo de Van Allen, para 2,1 MeV, e-flux para cinco níveis de energia diferentes, são eles: 1,8 MeV, 2,1 MeV, 2,6 MeV, 3,4 MeV, 4,2 MeV, no corte em 5 Lstar

Fonte: Produção do autor.

A densidade do fluxo de elétrons com energia de 2,10 MeV é marcada por uma queda abrupta em duas ordens de grandeza, vista no gráfico fluxo de partículas. A classificação fica mais evidente observando e-fluxo no momento datado da chegada da estrutura a Terra, além de registrar uma queda de no mínimo uma ordem de grandeza, para todos os níveis de energia representados no corte de 5 Lstar, representados na Figura 1.10.

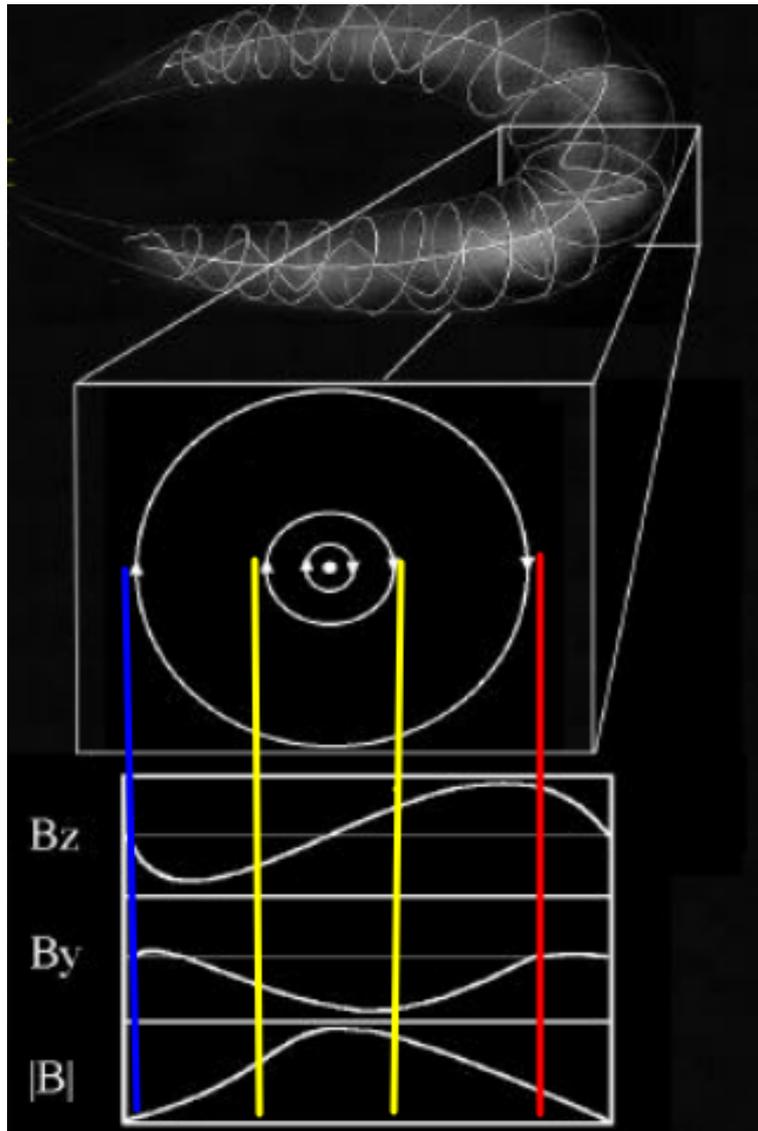
## 1.6 Nuvens Magnéticas

Burlaga e Klein (1982), apresentam uma primeira proposta para uma definição de Nuvem Magnética, para estruturas magnéticas interplanetárias que apresentassem características de expansão radial com uma extensão entre 0,25 UA-(unidades astronômicas) e 1 UA, ser munida de um campo magnético mais intenso que o do vento solar, ou seja,  $B > 10nT$ , apresentar uma rotação da direção do campo magnético em um ângulo perto de  $180^\circ$ , apresentar temperaturas que caem com a chegada da estrutura e valores para o parâmetro beta consequentemente baixos também, aproximadamente  $\beta < 0,1$  (DAL LAGO, 1999; BURLAGA et al., 1990; KLEIN, 1982)

Mas o comportamento relacionado com as propriedades de plasma e campo da estrutura que caracterizam uma nuvem magnética veio sendo estudado e construído a muito tempo. Gold (1962) postulou como "magnetic tongue" ou língua magnética, as ICMEs conectadas ao Sol. Gosling et al. (1973) observou para alguns eventos interplanetários geradores de tempestades magnéticas, baixas temperaturas de próton  $T_p$  no vento solar logo após o choque, e denominou a estrutura causadora do distúrbio como "magnetic bottles", ou garrafas magnéticas.

Se os campos estão fechados, tem se nuvem ou estrutura de bolha magnética (GONZALEZ et al., 1994). O material solar confinado na "garrafa magnética", "magnetic tongue" ou nuvem magnética explicaria as temperaturas baixas, baixo número de prótons do vento solar e variações no campo magnético. Burlaga (1988) propôs a descrição destas estruturas por um modelo "livre de forças", onde a força magnética total é nula, através do equilíbrio entre o gradiente de pressão magnética e a curvatura do campo. Uma ilustração artística da configuração deste campo pode ser vista na Figura 1.11 :

Figura 1.11 - Ilustração do campo magnético de uma Nuvem Magnética

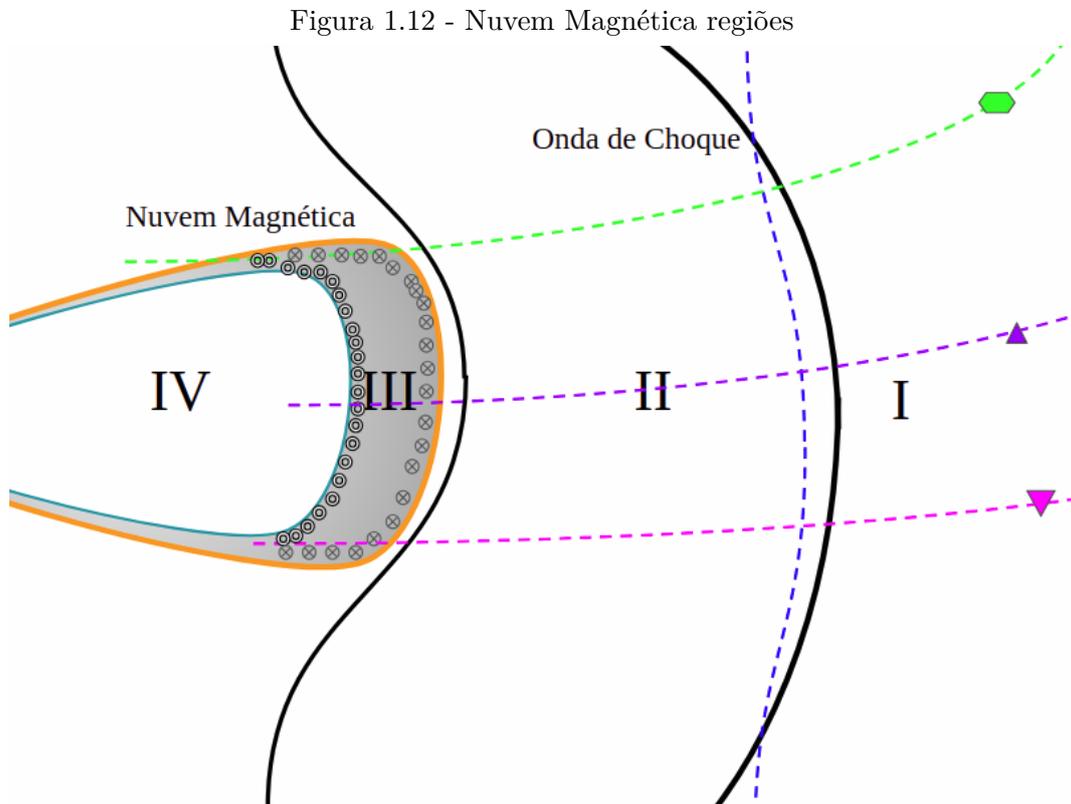


Representação do campo magnético tridimensional de uma Nuvem Magnética segundo o modelo “livre de forças”.

Fonte: Adaptado de DAL LAGO (1999)

Portanto, a Figura 1.11 representa uma nuvem magnética segundo o modelo "livre de forças", apresentando graficamente o comportamento esperado teoricamente para cada região  $B_z$ ,  $B_y$  e  $|B|$  respectivamente para passagem da estrutura modelada. As linhas vermelha, amarela e azul marcam os valores aproximados, esperados, respectivos à posição relativa. Pelo gráfico  $B_z$  observa-se uma rotação da direção do campo magnético na direção em  $z$ , de valores negativos para valores positivos no

intervalo da estrutura entre a linha vermelha início e a linha azul final. Nota-se que a intensidade do campo magnético  $|B|$  é maior no centro da estrutura entre as linhas amarelas. Segundo DAL LAGO (1999) na prática muitas vezes não é observado, esse perfil simétrico da magnitude do campo magnético descrito pelo modelo “livre de forças” ou “fluxo em corda”. O que corrobora essa não modulação dos parâmetros com a realidade, muitas vezes é a trajetória relativa que o instrumento realiza ao passar pela estrutura. Na Figura 1.12 as linhas pontilhadas em verde, roxo e rosa, indicam artisticamente diferentes possíveis trajetórias da nuvem pelo instrumento, mostrando comportamentos distintos das componentes  $B_z$ ,  $B_y$  e  $|B|$  observadas *in situ*.



I - Região Frontal, II - Região da lâmina entre a nuvem e a onda de choque, III - Região interna da Nuvem Magnética, IV Região logo atrás da Nuvem Magnética

Fonte: Produção do autor.

## 2 OBJETIVO E DESCRIÇÃO DO TRABALHO

### 2.1 Objetivo Geral

O objetivo do presente trabalho é estudar a diminuição (*dropout*) no fluxo de elétrons do cinturão de radiação de Van Allen durante a passagem de ICMEs pela magnetosfera terrestre. Para isso, são utilizados dados das sondas Van Allen *Probes*, que orbitam a Terra desde 2012, obtendo dados do fluxo de partículas dos cinturões de radiação e os dados do satélite *Advanced Composition Explorer* (ACE), que mede os parâmetros do vento solar no meio interplanetário, além do índice geomagnético simétrico.

### 2.2 Objetivo Específicos

Para os eventos de ICMEs, no período de agosto de 2012 até dezembro de 2016, através de métodos estatísticos relaciona-se os observáveis físicos que quantificam o fluxo de elétrons no cinturão de radiação externo de Van Allen e tenham relação com parâmetros do meio interplanetário.

#### 2.2.1 Obtenção e Tratamento de Dados

A obtenção dos dados para futura interpretação física correta é crucial para o sucesso do trabalho. Sendo assim o desenvolvimento da lógica de aquisição e tratamento de dados, deve ser metódica e concisa, seguindo a organização disposta abaixo.

- a) Familiarização de buscas de dados em instrumentos a bordo dos satélites ACE e DSCOVR e sonda Van Allen Probes para obtenção dos dados de fluxo de elétrons e parâmetros do meio interplanetário.
- b) Análise das variáveis físicas do meio interplanetário relacionadas com o fluxo de elétrons no cinturão de radiação externo.
- c) Manipulação de dados com as variáveis do meio interplanetário e cinturão de radiação de Van Allen.
- d) Seleção, criação e interpretação de critérios para formação de tabelas, relacionadas aos respectivos eventos precursores de *dropout*, apenas para os períodos de ICMEs associados dentro do intervalo de tempo de Agosto de 2012 a Dezembro de 2016.
- e) Adaptação de programas e construção de rotinas interpretativas graficamente e

estatisticamente, para análises de parâmetros do meio interplanetário em conjunto com parâmetros referentes ao fluxo de partículas no cinturão de radiação de Van Allen.

f) Aplicação de métodos estatísticos a fim de refinar a análise de dados e interpretação física.

### 3 MOTIVAÇÃO

É durante o fenômeno de tempestades geomagnéticas que os campos magnéticos do meio interplanetário e da Terra se interconectam, através do fenômeno da reconexão magnética (DUNGEY, 1961; SOUZA et al., 2016). Durante a reconexão, o plasma do vento solar entra na magnetosfera, o que propicia a troca de partículas entre os campos, desta forma, conhecer o comportamento do fluxo de partículas durante a ocorrência de tempestades geomagnéticas é muito importante, tanto do ponto de vista da reconexão, quanto da dinâmica de partículas aprisionadas.

Em uma reconexão magnética, ocorre a intensificação de correntes elétricas na magnetosfera, na ionosfera e na superfície terrestre, aceleração de partículas carregadas, surgimento de auroras nos polos e ainda a possibilidade de serem a causa de diversos danos em satélites e sistemas de comunicação e de transmissão de energia elétrica (KIRCHHOFF, 1991; KIVELSON; RUSSELL, 1995).

Conhecer o comportamento da magnetosfera e dinâmica de partículas nos cinturões de radiação, frente a tempestades geomagnéticas tem um impacto direto na prevenção e vida útil de sistemas de comunicação via satélites e sistemas de transmissão de energia elétrica (BOTELER et al., 1998). Além do tema ter relação direta em diversas áreas, como Medicina, Biologia, Ciências Espaciais, Telecomunicações, Tecnologias.

A radiação espacial é composta principalmente de prótons e elétrons energéticos, onde as doses de radiação referentes a prótons são geralmente originados de raios cósmicos galácticos e os elétrons de partículas energéticas provenientes do Sol (KUBO et al., 2015). Um distúrbio súbito no campo geomagnético influencia os níveis de radiação tanto de prótons quanto de elétrons.

Segundo Kubo et al. (2015) a radiação proveniente de prótons é mais prejudicial à saúde do que a radiação de elétrons, a qual tem uma influencia maior na interferência de equipamentos embarcados, eletrônicos.

Essa radiação espacial pode afetar astronautas, tripulantes de aeronaves em voos polares e ainda existe a possibilidade de que seres vivos, na superfície da Terra, sejam afetados (OLIVEIRA et al., 2009). Existem indícios de que as tempestades geomagnéticas possam causar problemas de orientação e navegação de alguns animais como abelhas e pássaros migratórios, os quais usam o campo geomagnético para se localizarem (OLIVEIRA et al., 2009). As partículas aprisionadas no cinturão de radiação externo, principalmente as relativísticas e ultra-relativísticas, tem parcela

significativa nas doses de radiação da magnetosfera.

## 4 DADOS E METODOLOGIA

O presente capítulo apresenta a forma de obtenção dos dados e a instrumentação utilizada bem como as plataformas de onde foram extraídos. Além disso, são demonstrados: a metodologia de classificação dos eventos de interesse e os critérios adotados para a análise.

### 4.1 Descrição e Escolha dos Instrumentos

A seleção dos eventos de tempestades geomagnéticas, foi realizada para o período de Agosto de 2012 até dezembro de 2016, com o critérios de selecionar apenas eventos geradores de tempestades magnéticas ocasionados por ICMEs, assim os dados do meio interplanetário e vento solar captados pelos instrumentos SWEPAM e MAG, a bordo do satélite “Advanced Composition Explorer” – ACE (STONE et al., 1998), foram adquiridos através da base de dados disponível em: <https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>. O instrumento SWEPAM mede o fluxo de partículas, elétrons e íons no vento solar em função da sua posição e da energia além dos momentos básicos de plasma do vento solar, já o instrumento MAG fornece dados de campo magnético interplanetário.

A partir de 2015 são utilizados dados do satélite *Deep Space Climate ObservatoRy* DSCOVR, que substituiu o satélite ACE, lançado através de uma parceria entre a NOAA - *National Oceanic and Atmospheric Administration*, a NASA - *National Aeronautics and Space Administration* e a Força Aérea dos Estados Unidos da América, o qual orbita o Sol no ponto de lagrangiano - L1. Os sensores do satélite podem detectar dados do meio interplanetário, através dos instrumentos (Faraday Cup) e (MAG)(PlasMag) da NOAA, medindo parâmetros do plasma solar e campo magnético respectivamente (CAMERA, 2015).

Foram escolhidos eventos de ICMEs no período de Agosto 2012 a Dezembro de 2016, cujos dados das sondas Van Allen estão disponíveis em [https://rbsp-ect.lanl.gov/data\\_pub/](https://rbsp-ect.lanl.gov/data_pub/). Tais sondas possuem equipamentos idênticos, para detectar as partículas presentes no cinturões de radiação, bem como sua energia e ângulo de passo. Para isso, a carga útil chamada *Thermal Plasma Suite* (RBSP-ECT) (BAKER et al., 2006), que é composta por três instrumentos: o *Helium Oxygen Proton Electron* (HOPE); *Magnetic Electron Ion Spectrometer* (MagEIS); e *Relativistic Electron Proton Telescope* (REPT). Nesse trabalho serão utilizados dados do REPT, que fornece informações sobre a densidade de elétrons direcionais na faixa de  $10^2 - 10^6$  (*partículas/cm<sup>2</sup>.s.sr.MeV*) e os espectros de energia desde 2 até 6  $R_e$  (BAKER

et al., 2006).

O estudo da variação do fluxo de partículas na região do cinturão de Van Allen é comparado ao índice simétrico (SYM-H), cuja definição é similar a do índice Dst, mas com maior resolução temporal (uma medida por minuto, enquanto que o índice Dst tem um ponto a cada hora), disponível em <https://cdaweb.sci.gsfc.nasa.gov/index.html/>.

Para a interpretação dos dados do campo magnético terrestre, foram obtidos os dados do magnetômetro MSTK localizado em Ministik Lake, Canadá. Magnetômetro esse de superfície e proveniente da rede CARISMA - Canadian Array for Real time Investigations of Magnetic Activity (MANN et al., 2008) com dados disponíveis em <http://www.carisma.ca/>.

## 4.2 Metodologia para análise dos eventos

As estruturas de grande escala desencadeadores dos processos físicos e dinâmicos envolvidos na diminuição no fluxo de elétrons na região que são objeto de estudo nesse trabalho são as ICMEs. Como o foco é relacionar *dropout* com variações provenientes das ICMEs, foram selecionados eventos no catálogo disponível em [http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icmetable2.htm#\(1\)](http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icmetable2.htm#(1)), que é um banco de dados de eventos interplanetários, que indica a ocorrência de ICMEs, Nuvens Magnéticas e variações nos parâmetros do meio interplanetário. Estão catalogadas ICMEs desde 1996, com base nos trabalhos de Cane e Richardson (2003) e Richardson e Cane (2010). Assim foi elaborada uma lista adaptado para o presente trabalho com as datas de ICMEs, dirigindo o foco do estudo que é a diminuição das partículas relativísticas nos cinturões, para o período de estudo, com um total de 97 eventos apresentados na Tabela 4.1, a seguir:

Tabela 4.1 - Todos eventos estudados

<i>Distúrbio</i>	<i>Y/M/D (UT)</i>	<i>dV (km/s)</i>	<i>Vc (km/s)</i>	<i>Vmax (km/s)</i>	<i>B (nT)</i>	<i>MC</i>	<i>Dst (nT)</i>
	2012/10/08 0516	70	390	420	16	2	-107
	2012/10/12 1900	40	490	530	11	2	-90
	2012/10/31 1538	70	340	370	11	2	-65
	2012/11/09 0300	0	370	380	2	1	1
	2012/11/12 2311	50	380	460	21	2	-108
	2012/11/23 2152	70	380	410	12	1	-40
	2012/11/26 0512	90	450	530	6	0	-8
	2012/11/28 1800	20	360	380	4	0	-1
	2012/12/14 0200	30	330	330	7	2	9
	2013/01/17 1600	0	390	400	12	2	-52
	2013/01/18 1237	40	430	460	5	1	-25
	2013/02/13 1700	20	360	400	4	0	-37
	2013/02/16 1209	60	360	410	7	1	-40
	2013/03/17 0559	230	520	720	9	2	-132
	2013/03/20 1700	110	520	640	9	1	-39
	2013/04/13 2254	100	410	520	9	2	-6
	2013/04/30 0949	50	400	430	10	2	-47
	2013/05/01 0900	30	430	460	10	1	-72
	2013/05/25 2000	140	660	750	7	0	-47
	2013/06/06 0255	30	430	510	11	2	-78
	2013/06/08 0600	20	430	450	3	1	-20
	2013/06/27 1438	70	390	450	10	2	-102
	2013/07/05 0100	10	350	370	10	2	-87
	2013/07/12 1714	60	430	500	13	2	-81
	2013/08/20 2227	30	460	470	7	1	-26
	2013/08/22 1926	40	470	570	6	1	-40
	2013/08/24 0003	30	400	520	4	1	-29
	2013/10/02 0154	220	470	630	7	2	-72
	2013/10/08 2020	100	480	650	6	0	-69
	2013/11/08 2200	0	420	460	12	2	-80
	2013/11/11 1700	0	460	480	7	1	-30

Tabela 4.1 - Continuação

<i>Distúrbio</i>	<i>Y/M/D (UT)</i>	<i>dV (km/s)</i>	<i>Vc (km/s)</i>	<i>Vmax (km/s)</i>	<i>B (nT)</i>	<i>MC</i>	<i>Dst (nT)</i>
	2013/11/30 2000	30	450	540	9	2	-22
	2013/12/15 1300	30	460	500	7	2	-23
	2013/12/24 2100	30	300	330	11	2	-35
	2014/02/05 1400	50	370	400	7	0	-31
	2014/02/07 1705	110	420	460	9	2	-39
	2014/02/10 1800	60	430	560	6	1	-24
	2014/02/15 1316	100	380	450	15	2	-24
	2014/02/17 0300	0	400	410	6	1	-27
	2014/02/18 0640	60	400	410	8	1	-67
	2014/02/19 0348	60	520	530	11	2	-119
	2014/02/20 0318	180	490	690	6	0	-95
	2014/04/05 1000	40	380	500	13	2	-15
	2014/04/11 0600	10	350	380	5	2	-86
	2014/04/18 1900	0	490	500	8	0	-19
	2014/04/19 1836	30	510	530	5	1	-14
	2014/04/20 1056	200	540	700	6	1	-32
	2014/04/29 2000	0	310	320	9	2	-67
	2014/06/07 1652	60	480	610	9	0	-37
	2014/08/19 0657	40	360	440	17	2	-28
	2014/09/12 1553	230	600	720	20	2	-88
	2014/09/17 0200	0	310	320	9	1	-18
	2014/11/10 0220	50	480	520	9	0	-65
	2014/12/21 1911	70	380	430	16	2	-71
	2015/01/02 0717	20	390	450	8	1	-42
	2015/01/03 1400	10	430	460	9	1	-62
	2015/01/07 0616	30	450	470	16	2	-99
	2015/03/16 1400	30	420	440	11	0	16
	2015/03/17 0445	90	560	620	20	2	-223
	2015/03/21 2054	70	640	700	8	0	-43
	2015/03/28 0000	10	390	420	13	2	-29
	2015/03/29 1500	20	360	390	6	0	-28
	2015/03/31 0832	40	400	420	13	2	-2
	2015/04/09 1011	30	380	390	12	0	1

Tabela 4.1 - Conclusão.

<i>Distúrbio Y/M/D (UT)</i>	<i>dV (km/s)</i>	<i>Vc (km/s)</i>	<i>Vmax (km/s)</i>	<i>B (nT)</i>	<i>MC</i>	<i>Dst (nT)</i>
2015/04/10 0000	40	380	450	13	2	-75
2015/05/06 0141	80	420	470	13	2	-28
2015/05/07 2100	0	390	400	6	0	-8
2015/05/10 1200	0	370	400	11	2	-51
2015/05/18 1900	40	460	480	16	2	-44
2015/06/22 1833	190	610	740	14	1	-204
2015/06/24 1329	170	550	720	5	0	-86
2015/06/26 0600	50	490	560	5	1	-57
2015/07/13 0138	40	490	650	8	0	-61
2015/08/07 0600	10	510	560	9	0	-25
2015/08/15 0829	10	500	510	12	1	-84
2015/08/26 0800	20	370	420	11	1	-92
2015/09/07 1400	190	460	600	15	2	-94
2015/09/13 0700	10	460	480	5	0	-38
2015/09/20 0604	120	510	600	5	0	-75
2015/10/24 1854	60	430	490	7	1	-7
2015/11/04 0355	70	640	740	8	1	-60
2015/11/06 1818	90	500	680	13	2	-89
2015/12/19 1616	110	400	490	15	2	-155
2015/12/31 0050	90	440	480	10	2	-117
2016/01/18 2157	70	370	400	14	2	-93
2016/01/24 1400	30	410	490	5	1	-10
2016/03/05 0516	10	360	370	12	2	-4
2016/03/20 0700	20	400	430	7	1	-42
2016/04/14 0735	30	420	480	8	1	-59
2016/04/17 0300	0	400	440	5	1	-25
2016/07/19 2305	110	440	570	10	2	-23
2016/07/24 2200	50	430	450	7	2	-34
2016/07/25 2200	0	370	390	4	0	-10
2016/08/02 1400	10	420	460	20	2	-14
2016/10/12 2201	80	390	460	19	2	-104
2016/11/04 1800	0	350	360	4	0	-17
2016/11/09 0604	50	360	370	11	2	-59

Na Tabela 4.1, a coluna **Distúrbio Y/M/D (UT)** refere-se à data exata do valor apontado na coluna **Dst nT** que indica a chegada da estrutura à Terra, onde convencionou-se que Y = ano, M = mês D = dia, para formato de hora (UT) - *universal time*. A coluna **Vc** aponta a média da velocidade do vento solar momentos antes do choque da estrutura dado em  $Km/s$ ; os valores de **Vmax** indicam o maior valor da velocidade do vento solar no período da perturbação também em  $Km/s$ , **dV** indica a variação na velocidade do vento solar em  $Km/s$ . Já a coluna **B** apresenta a intensidade média do campo magnético da ICME, em  $nT$ , com base no intervalo que precede a estrutura. A coluna **MC**, refere-se ao tipo de estrutura, apresenta as valores de '0', '1', '2', nas suas linhas, onde '2' indica que uma nuvem magnética foi relatada em associação com o ICME tendo as características claras de uma nuvem magnética, porém não garante ser uma nuvem magnética, '1' indica que o ICME mostra evidência de uma rotação na direção do campo, mas faltam algumas características de uma nuvem magnética, '0' indica que a ICME não é uma nuvem magnética relatada e não possui a maioria das características de uma nuvem magnética. Por último **Dst nT** aponta o menor valor encontrado para o índice Dst para o período do evento.

### 4.3 Critérios de classificação

A diminuição da população do cinturão de radiação externo durante o período de uma tempestade e a dinâmica da região horas após a chegada da estrutura solar, são complexas e dependem de diversos fatores. Categorizar e separar os eventos a serem estudados, é basicamente particionar um problema buscando soluções e melhor entendimento.

Esta separação deve seguir uma lógica física a fim de agrupar casos semelhantes, para uma futura análise genérica. Sendo assim, separar em categorias os eventos no período de estudo visa a uma melhor análise física.

#### 4.3.1 Classificação dropout

Sendo o foco do trabalho a diminuição das partículas relativísticas nos cinturões de radiação externo, deve-se selecionar apenas os eventos que se classifiquem como dropout. Isso foi feito através da análise gráfica temporal para todos os 97 eventos.

Através da interpretação gráfica da ilustração da região do cinturão de radiação em 2.1 MeV, em um mapa de cor e o fluxo de elétrons, em um corte que compreende o cinturão externo de Van Allen para a linha horizontal em  $Lstar = 5,5 Re$  (linhas

contínuas) esboçado em e-flux assim, a densidade de partículas para cinco níveis de energias (1,80 MeV – linha azul forte, 2,10 MeV – linha verde, 2,60 MeV – linha em vermelho 3,40 MeV - linha em azul forte e 4,2 MeV - linha em lilás), na interpretação os critérios usados para identificar a ocorrência de dropout, considerando a atividade de dropout conforme Turner et al. (2012), nas Figuras 4.1 e 4.2, seguem dois exemplos de CMEs que mostram a ocorrência de dropout e não ocorrência de dropout, para datas compreendidas no estudo.

Figura 4.1 - Período com dropout

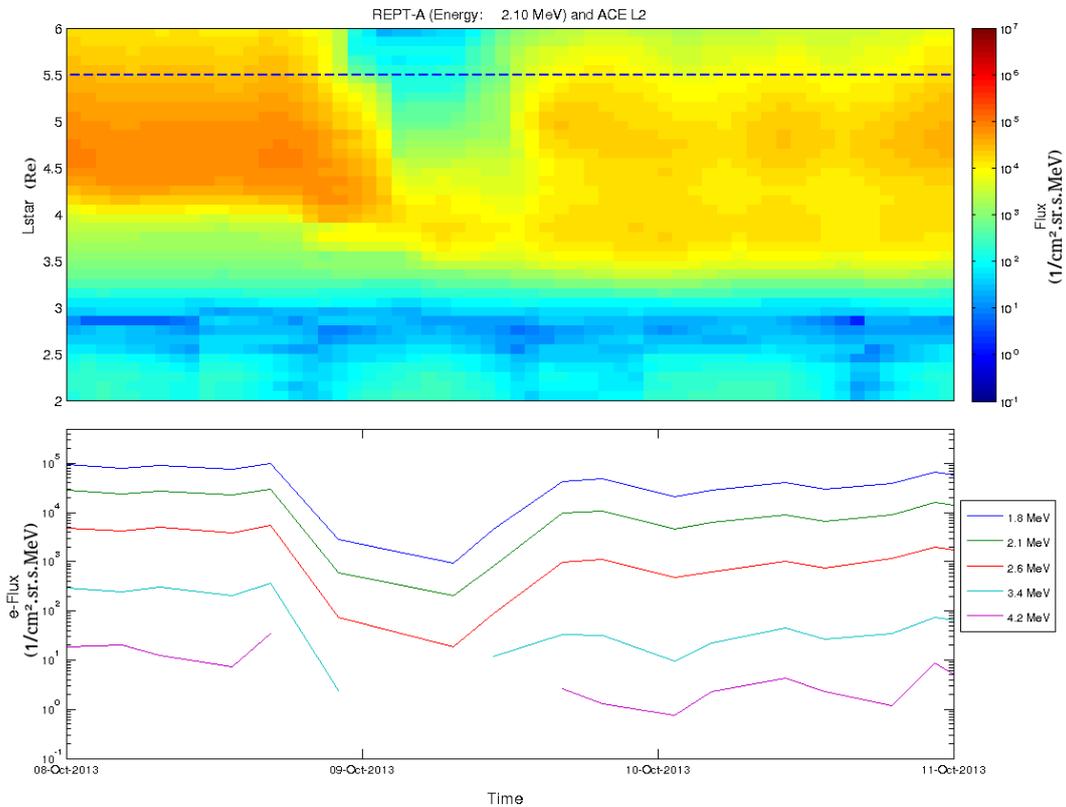


Gráfico temporal que mostra período com dropout para CME que atinge a Terra ao final do dia 8 de outubro e início do dia 9 outubro de 2013, com representação do fluxo de partículas do cinturão externo de Van Allen, para 2.1 MeV, e-flux para 5 canais de energia.

Fonte: Produção do autor.

A densidade do fluxo de elétrons com energia de 2,10 MeV na Figura 4.1 é marcada com perda na população de partículas de aproximadamente três ordens de grandeza vistas no painel superior Lstar-Flux, para alturas entre 4 e 6 Lstar. A classificação

fica mais evidente, observando o e-fluxo no momento datado da chegada da estrutura à magnetosfera, marcado por uma queda para todos níveis de energia representados no corte de 5.5 Lstar. Após essa avaliação quantitativa pode-se classificar esse um evento com ocorrência de dropout.

Figura 4.2 - Período sem dropout

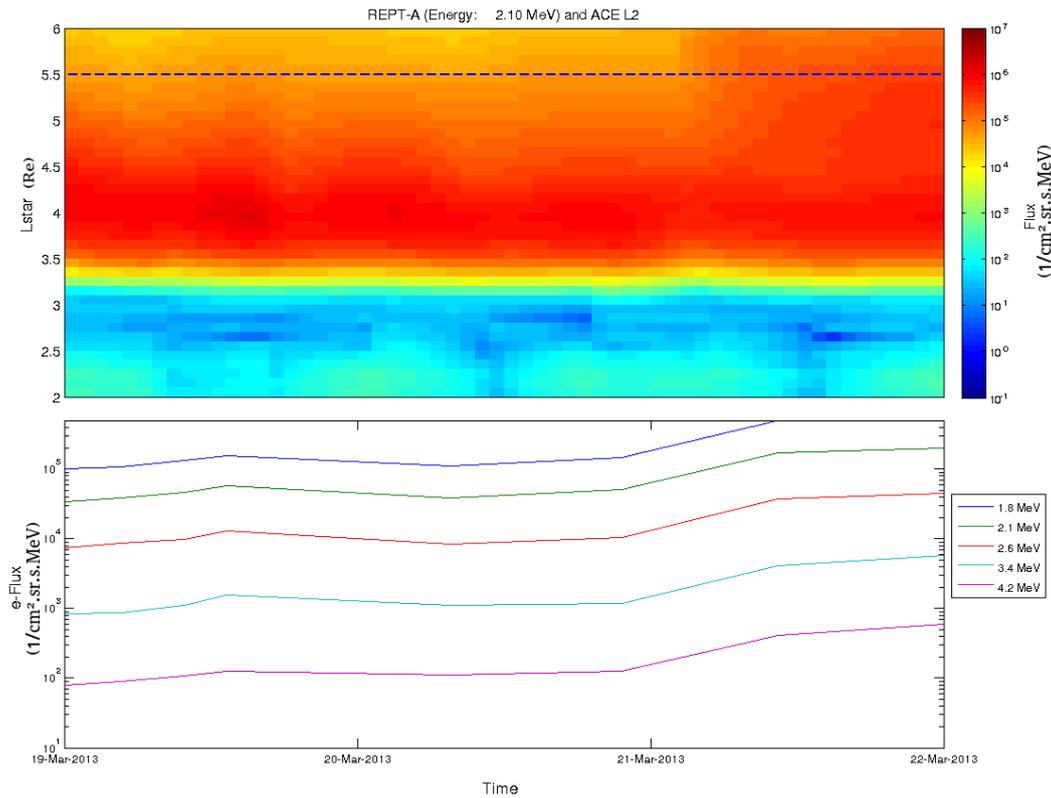


Gráfico temporal que mostra período sem dropout para CME que atinge a Terra no dia 20 março de 2013, com representação do fluxo de partículas do cinturão externo de Van Allen, para 2.1 MeV, e-flux para 5 canais de energia.

Fonte: Produção do autor.

A densidade do fluxo de elétrons com energia de 2,10 MeV na Figura 4.2 não apresenta perda na população de partículas tornando-se muito difícil distinguir a grandeza vista no painel e-Flux para alturas compreendendo tanto o cinturão interno quanto o externo. A classificação fica mais evidente observando e-fluxo no momento datado da chegada da estrutura à magnetosfera, marcado por um leve aumento observado por uma ondulação para todos níveis de energia representados no corte de 5.5 Lstar, assim após essa avaliação quantitativa pode se atribuir à respectiva data,

a não ocorrência de dropout no evento. Com essa mesma lógica foi analisado todo período de estudo, separando eventos com ocorrência de dropout e acrescentando à tabela de datas uma coluna referente à ocorrência ou não de dropout.

### 4.3.2 Classificação Tipo de Nuvem Magnética

Outro ponto importante é distinguir as ICMEs que se direcionam à Terra e classificá-las. Nuvens magnéticas são importantes produtores de tempestades intensas, e as principais causadoras do número total de tempestades geomagnéticas analisadas para o período. A polaridade da nuvem magnética na interação com a magnetosfera no estudo deve ser distinguida para análise. Dado o sistema GSM como referência, situações com o eixo da nuvem magnética não estar perfeitamente alinhado (rotação em Z) ou perpendicular (rotação em Y) ao plano da eclíptica, com várias possíveis inclinações intermediárias. De acordo com [Gonzalez et al. \(1990\)](#), foram observado em alguns eventos rotação nas direções Y e Z. Nestes casos, a polaridade da nuvem foi definida de acordo com a componente com a maior variação, mesma lógica empregada no estudo estatístico de [Echer \(2010\)](#).

Assim, as nuvens magnéticas são classificadas de 3 formas, N-S (componente  $B_z$  rotacionando de norte para sul), S-N ( $B_z$  rotacionando do sul para o norte), Y-S (componente  $B_y$  rotacionando de leste a oeste ou oeste a leste, com o componente  $B_z$  na direção sul)

Figura 4.3 - Exemplo de dados para uma nuvem magnética, N-S (componente Bz girando de Norte a Sul)

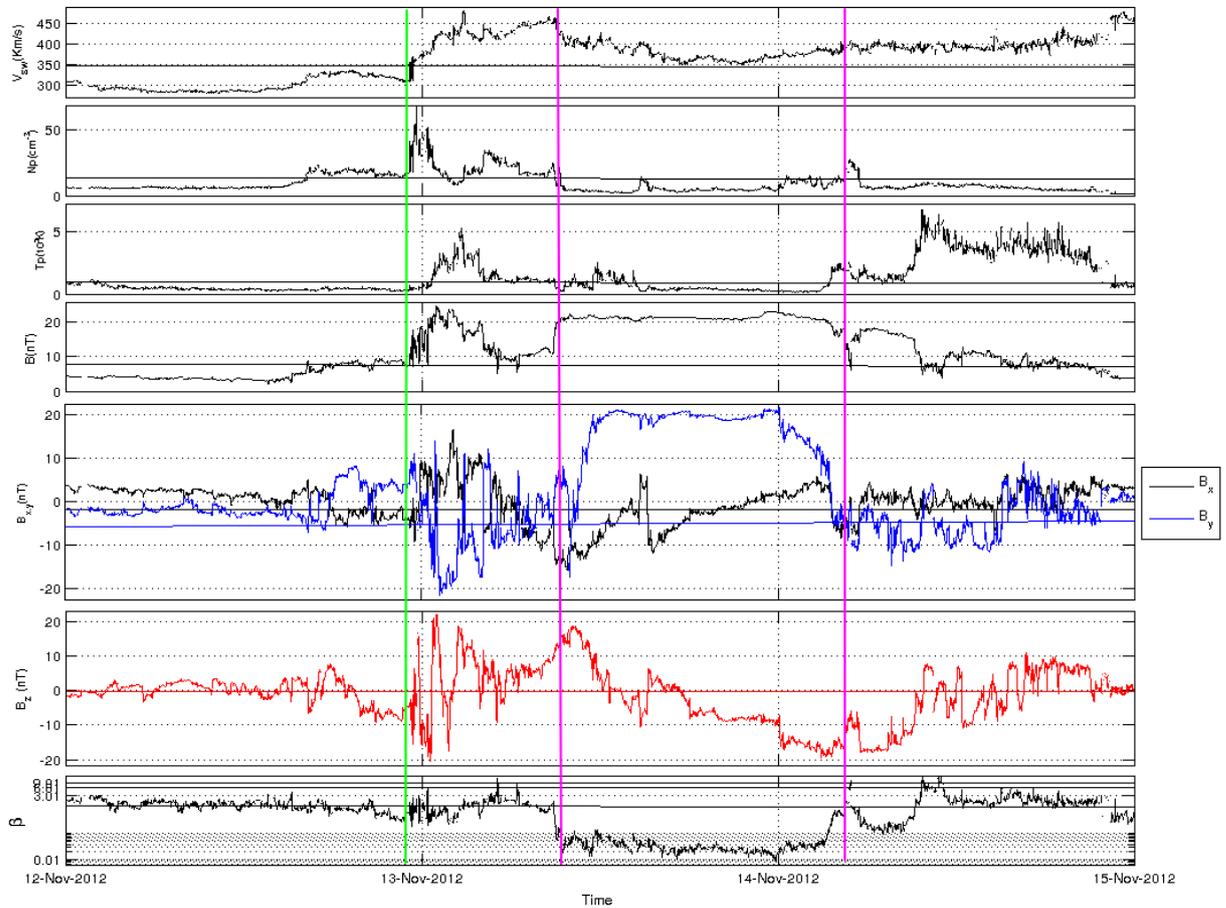


Gráfico temporal para um evento de CME no dia 12 de novembro de 2012. Na ordem de cima para baixo tem-se, representação da velocidade do vento solar  $V_{sw}$  em Km/s, densidade de partículas  $N_p$  em  $cm^{-3}$ , temperatura de íons  $T_p$  em K, seguida do campo magnético interplanetário total  $B$  em nT, componentes x e y do campo magnético interplanetário representados por  $B_x$  e  $B_y$ , respectivamente em nT, componente z do campo magnético interplanetário  $B_z$  em nT e por último o parâmetro  $\beta$ .

Fonte: Produção do autor

A região compreendida entre as linhas verticais verde e primeira linha rosa indica a região da lâmina entre a nuvem e a onda de choque, gerada pela expansão da própria nuvem e interação com o vento solar, notável pelo salto abrupto nos parâmetros, do vento solar, e variações bruscas nas componentes do campo magnético interplanetário, ao final do dia 12 de novembro de 2012. A região interna da nuvem, delimitada

pelas linhas verticais em rosa, evidenciada nesse caso principalmente pela queda no parâmetro  $\beta$ , último painel. Intervalo esse que sugere uma rotação na componente Z do campo magnético observada em  $B_z$  graficado em vermelho, rotação essa que passa de valores  $20nT$  para  $-20nT$ . O módulo de  $|B|$  no intervalo é praticamente constante. Ocorre uma rotação em  $B_x$ , mas  $B_y$  varia praticamente junto com  $|B|$  na nuvem. O que pela definição proposta classifica tal evento como Nuvem magnética N-S.

Figura 4.4 - Exemplo de dados para uma nuvem magnética, S-N ( $B_z$  componente que gira do Sul para o Norte)

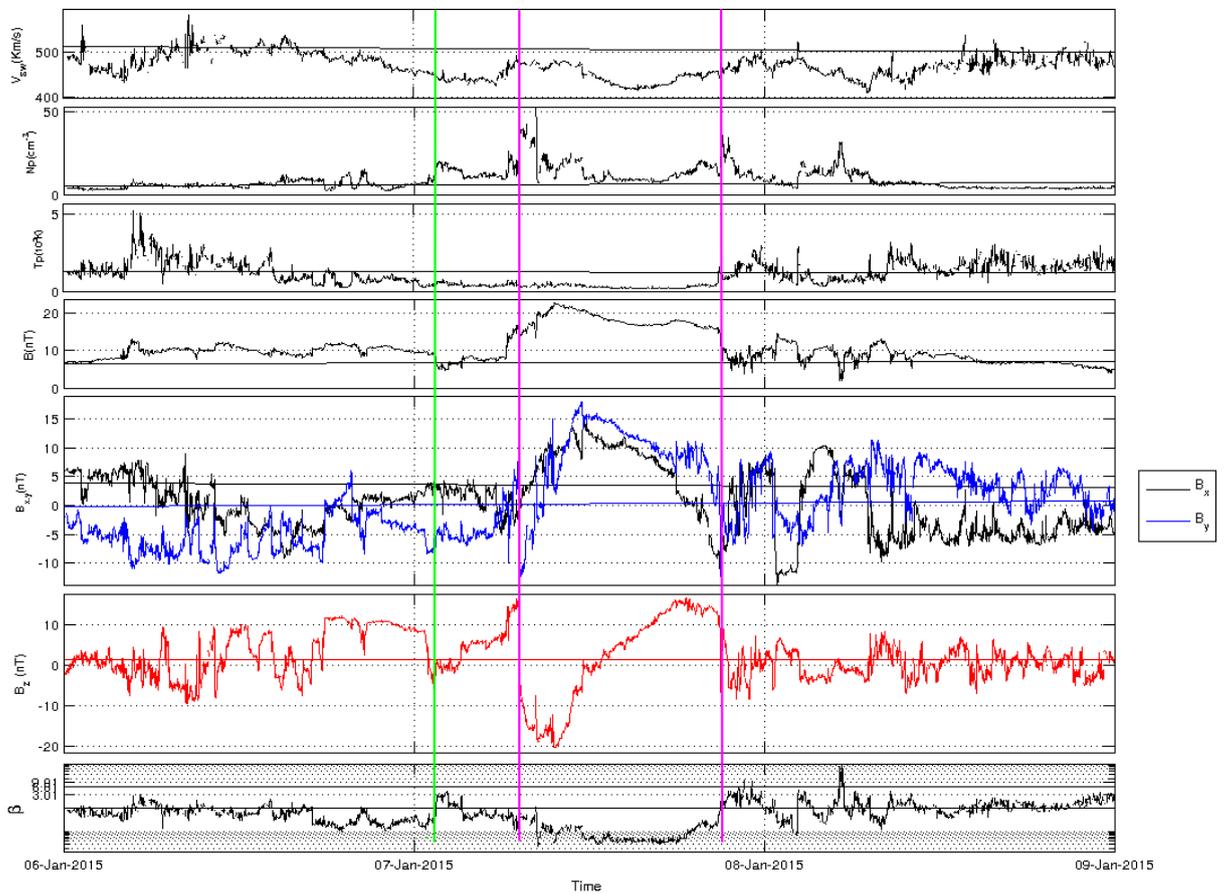


Gráfico temporal para um evento de ICME no dia 7 de janeiro de 2015. Na ordem de cima para baixo tem-se, representação da velocidade do vento solar  $V_{sw}$  em Km/s, densidade de partículas  $N_p$  em  $cm^{-3}$ , temperatura de íons  $T_p$  em K, seguida do campo magnético interplanetário total  $B$  em  $nT$ , componentes x e y do campo magnético interplanetário representados por  $B_x$  e  $B_y$ , respectivamente em preto e azul, em  $nT$ , componente z do campo magnético interplanetário  $B_z$  em  $nT$  e por último o parâmetro  $\beta$ .

Fonte: Produção do autor

A região interna da nuvem delimitada pelas linhas verticais em rosa, Figura 4.4, evidenciada nesse caso principalmente pela queda no parâmetro  $\beta$ , último painel, além da baixa temperatura e a característica de  $|B|$  e suas componentes. O intervalo sugere uma rotação na componente Z do campo magnético observada em  $Bz$ , rotação essa que passa de valores  $-20nT$  para  $20nT$ . Para o  $|B|$  no intervalo é notável um pico no momento que  $Bz$  é nulo, o que sugere ser o centro da estrutura;  $Bx$  e  $By$  variam praticamente juntas, tendo valores máximos no centro da estrutura de aproximadamente  $15nT$  classificando tal evento como Nuvem magnética S-N.

Figura 4.5 - Exemplo de dados para uma nuvem magnética, Y-S (componente girando de Leste a Oeste ou Oeste a Leste, com o componente Bz na direção Sul)

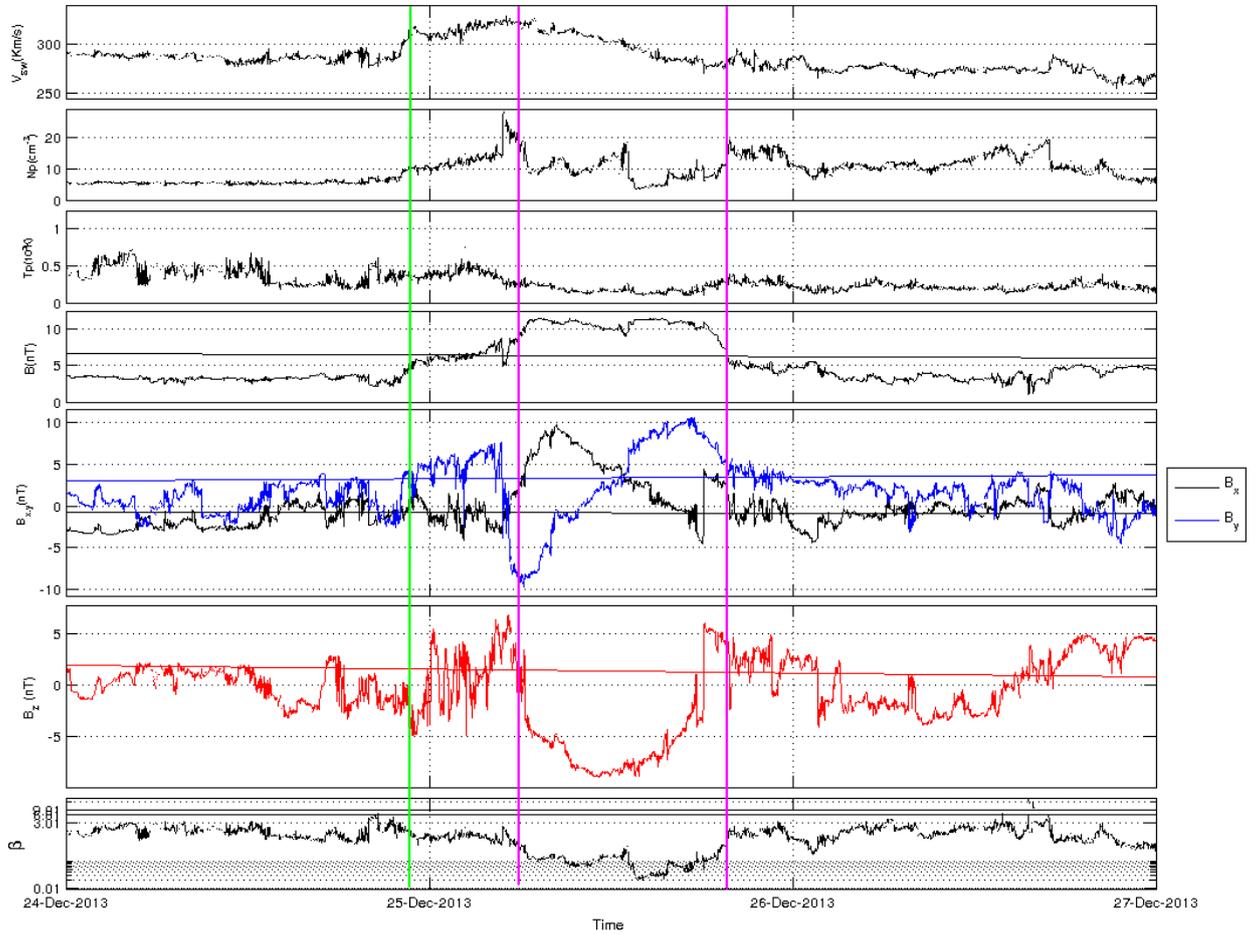


Gráfico temporal para um evento de CME no dia 25 de dezembro de 2013. Na ordem de cima para baixo tem-se, representação da velocidade do vento solar  $V_{sw}$  em Km/s, densidade de partículas  $N_p$  em  $cm^{-3}$ , temperatura de íons  $T_p$  em K, seguida do campo magnético interplanetário total  $B$  em  $nT$ , componentes x e y do campo magnético interplanetário representados por  $B_x$  e  $B_y$ , respectivamente em preto e azul, em  $nT$ , componente z do campo magnético interplanetário  $B_z$  em  $nT$  e por último o parâmetro  $\beta$ .

Fonte: Produção do autor.

A onda de choque marcada pela linha vertical verde, com variações contínuas e suaves nos parâmetros do vento solar, nos revelam uma estrutura bastante complexa, apresentando flutuações intensas nas componentes  $B_y$  e  $B_z$  logo após a onda de choque, suavizando na região interna da nuvem entre as linhas rosas.

Na Figura 4.5 o campo magnético apresenta rotações nas componentes  $B_y$  e  $B_x$ , podendo indicar que se trata de uma estrutura do tipo Nuvem Magnética, bastante inclinada em relação à Eclíptica. A temperatura se manteve relativamente baixa, durante a passagem da estrutura. Observa-se diminuição gradativa da velocidade ao longo do evento, o que sugere uma estrutura em expansão, tornando o evento mais complexo ainda. A região interna da nuvem delimitada pelas linhas verticais em rosa sugere uma rotação na componente  $Y$  do campo magnético, observada em  $B_y$  graficado em azul, rotação essa que passa de valores  $-10nT$  para  $+10nT$ . O módulo de  $|B|$  no intervalo é praticamente constante, com pequenas variações. Ocorre uma rotação concomitantemente em  $B_x$ , passando de valores positivos para negativos,  $B_z$  mantém-se praticamente constante e negativo tendo seu pico perto de  $-10nT$  aproximadamente no centro da nuvem. Basicamente tem-se na nuvem a inversão dos componentes  $X$  e  $Y$ , com o componente  $Z$  na direção sul, assim a classificação para tal evento se encaixa como Nuvem magnética Y-S.

#### 4.4 Critério de Categorização Dropout

Dentro do escopo da análise de época superposta, um dos critérios é similaridade entre os eventos e recorrência nas variações dos parâmetros. O fluxo de elétrons no cinturão de radiação e a recorrência dos parâmetros do meio interplanetário mostrou-se complexo, em diversos âmbitos estatísticos, para a amostra como um todo. A nova categorização dentro das estruturas, visa a uma melhor relação estatística dos parâmetros e semelhança entre os eventos, buscando características do cinturão e meio interplanetário, para serem comparados com as categorias de separação quanto a tipo de estrutura. O critério de separação em categorias para o cinturão tem como premissa:

*"Separar os eventos com dropout gerados por ICMEs em categorias; através do tempo de resposta na população de elétrons na região do cinturão "* (ALVES, 2018).

Assim o principal critério criado para categorizar e separar as ICMEs do período de estudo, que estão dispostas na Tabela 5.1, são os gráficos para análise, onde estão expressos temporalmente dados de densidade de fluxo de energia para 2.1 MeV, e-flux para 5 canais de energia, velocidade do vento solar e componente  $B_z$  do meio interplanetário tendo como prioridade os seguintes critérios, enumerados de i) a iv):

- i) Tempo de re-população na densidade de elétrons.
- ii) Momento da chegada da estrutura, para fluxo de elétrons na faixa de energia

estudada, com corte para  $L^*$  altos no cinturão externo.

iii) Comportamento da componente  $B_z$ , no intervalo de tempo em que ocorre a diminuição no fluxo de elétrons.

vi) Confirmação do evento. A análise da velocidade busca a afirmação dos dados do evento. Esperando a ocorrência simultânea que marca a chegada da estrutura.

Critérios que servem para classificar três categorias quanto ao tempo de repopulação no cinturão de radiação: o primeiro é referente a uma queda abrupta na densidade de partículas do cinturão externo com recuperação desta dentro de um dia, denominada de "recuperação rápida

- R.R; o segundo tem como característica, após o dropout, pouca ou nenhuma recuperação aparente na densidade de elétrons do cinturão externo para um período de um dia, denominada "recuperação lenta

- R.L; a terceira classificação, denominada como "complexo", refere-se a eventos em que o cinturão se comporta de forma singular, e que critérios do meio interplanetário não correspondem à dinâmica esperada do cinturão. Essa situação requer uma análise mais profunda no período, para identificação tanto das causas geradoras quanto do tipo de repopulação gerada.

Assim, a classificação entre **recuperação rápida** e **recuperação lenta** é resumida na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Critério de Classificação da análise gráfica

Critério	recuperação rápida	recuperação lenta
i*	> 24horas	< 24horas ou nenhuma
ii	vale em e-flux	(degrau em e-flux)*ou constância
iii	majoritariamente negativo	positivo/variações e inconstâncias
vi	Confirmação CMEs	Confirmação CMEs

A distribuição e organização quanto à separação e categorização para evento com estruturas e dinâmica complexas na população do cinturão, denominado "complexo", é melhor entendida pela união dos conjuntos, predefinido CMEs com dropout, onde não se encaixam com a classificação de recuperação rápida ou recuperação lenta, definição assim sendo dada por:

$$\text{"complexo"} = CMEs \cap dropout \cup R.R \cup R.L,$$

assim com os critérios estabelecidos para separação em classes quanto ao tipo de recuperação no cinturão de radiação de Van Allen, faz-se uma análise sistêmica através da lógica da Tabela 4.2 para categorizar os eventos da tabela Tabela 5.2, por meio de comparação gráfica. Seguem na Figura 4.6 - Tabela 4.3, Figura 4.6 - Tabela 4.4, Figura 4.8 - Figura 4.9 exemplos de classificações pelos critérios estabelecidos, onde foi feita a análise para recategorizar os dropouts do dia 22 de junho de 2015 e 12 de setembro de 2014, onde resultaram em recuperação rápida e recuperação lenta respectivamente:

Figura 4.6 - Exemplo: recuperação rápida

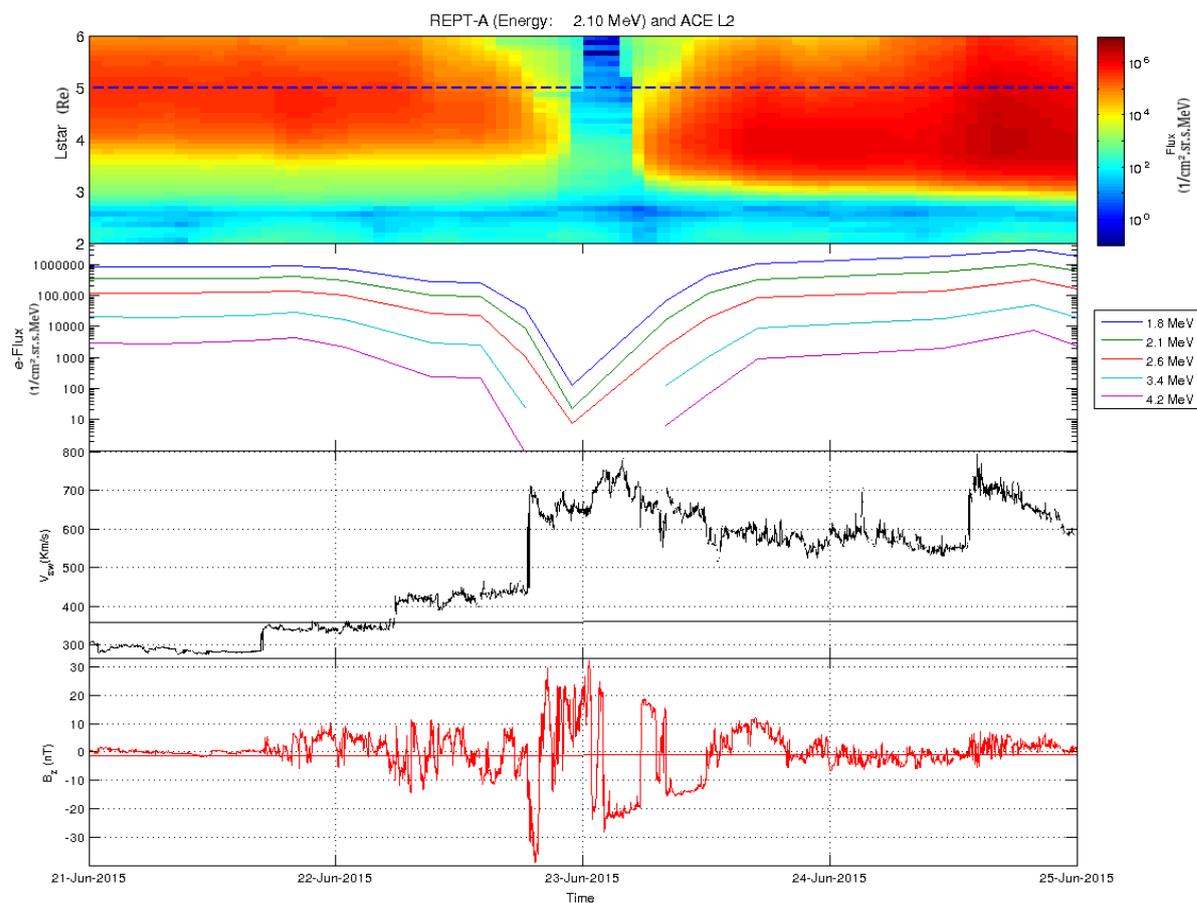


Gráfico temporal para um evento de CME no dia 22 de junho de 2015, com representação do fluxo de partículas do cinturão externo de Van Allen, para 2.1 MeV, e-flux para 5 canais de energia, ( $B_z$ ), dados em  $nT$  representado em vermelho.

Fonte: Produção do autor.

Tabela 4.3 - Critério de Classificação da análise gráfica para dropout ocorrido no dia 22 de junho de 2015

Critério	recuperação rápida	recuperação lenta
<b>i*</b>	V	F
<b>ii</b>	V	F
<b>iii</b>	V	F
<b>vi</b>	V	V

Onde V significa verdadeiro e F falso para os critérios da Tabela 4.2. Todas características gráficas da Figura 4.6 evidenciam a classificação de rápida re-população; o vale marcado pelo e-flux, a componente Bz a qual se mostra majoritariamente negativa no período onde ocorre o máximo esvaziamento de elétrons na população do cinturão para L\* acima de 4, a velocidade marca o momento do choque provocado pela chegada da estrutura.

Figura 4.7 - Exemplo: recuperação lenta

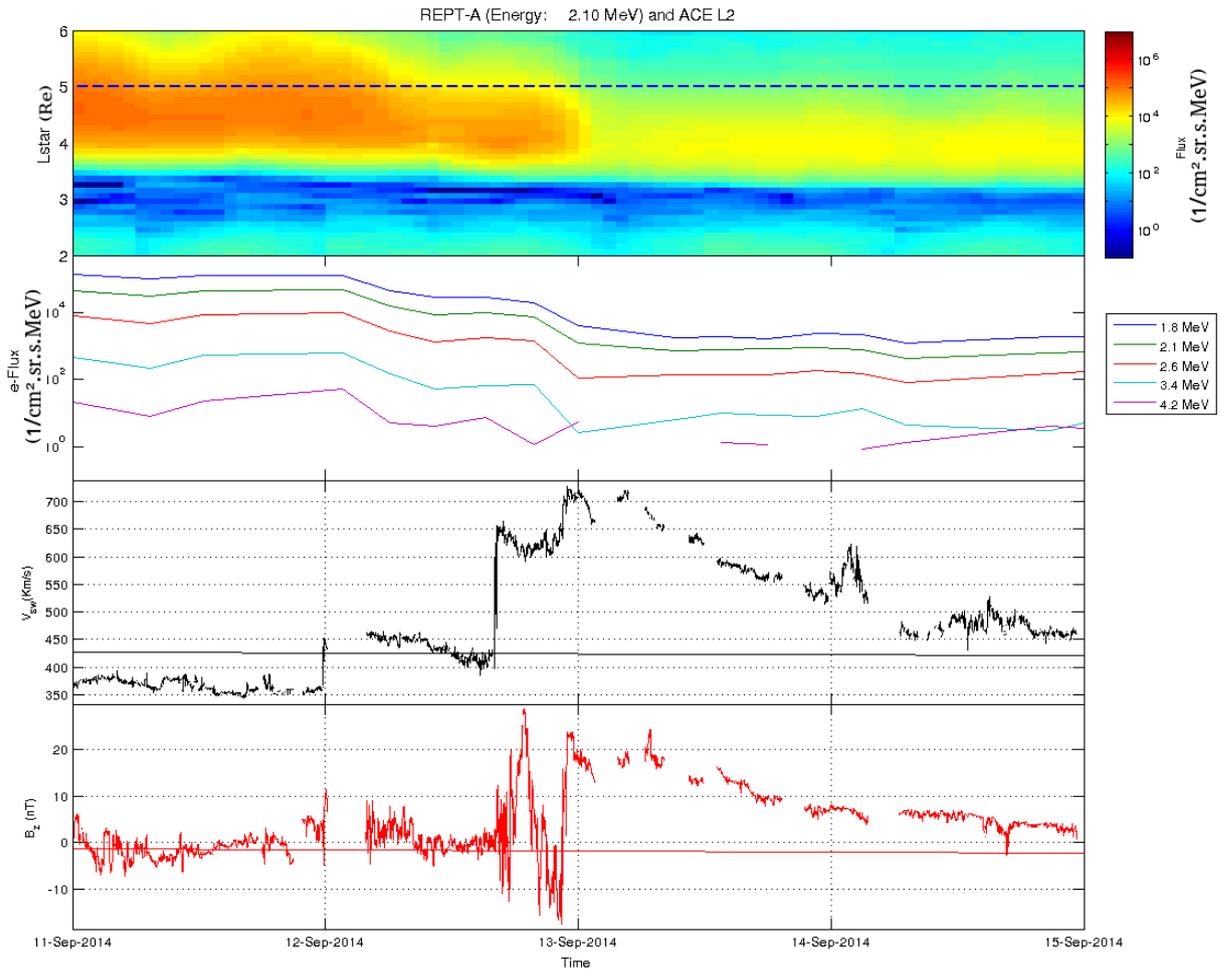


Gráfico temporal para um evento de CME no dia 12 de setembro de 2014, com representação do fluxo de partículas do cinturão externo de Van Allen, para 2.1 MeV, e-flux para 5 canais de energia, ( $B_z$ ), dados em  $nT$  representado em vermelho.

Fonte: Produção do autor.

Tabela 4.4 - Critério de Classificação da análise gráfica para dropout ocorrido no dia 12 de setembro de 2014

Critério	recuperação rápida	recuperação lenta
<b>i*</b>	F	V
<b>ii</b>	F	V
<b>iii</b>	F	V
<b>vi</b>	V	V

Todas características gráficas evidenciam a classificação em lenta re-população; o degrau marcado pelo e-flux, a componente Bz a qual se mostra majoritariamente positivo a partir do período onde ocorreu o dropout sem recuperação na densidade dentro de um período de 24 horas, a velocidade marcando o momento do choque provocado pela chegada da estrutura.

Figura 4.8 - Exemplo: evento complexo

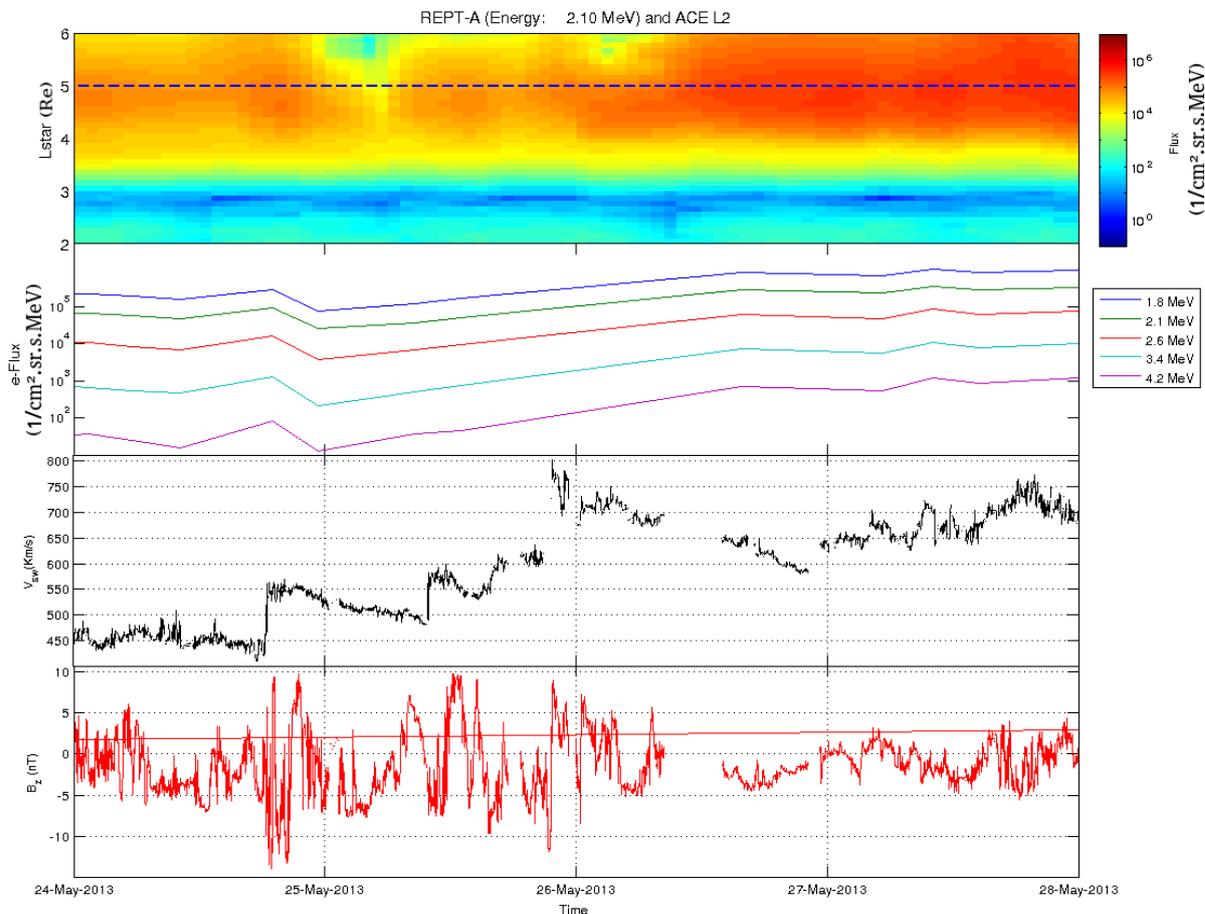
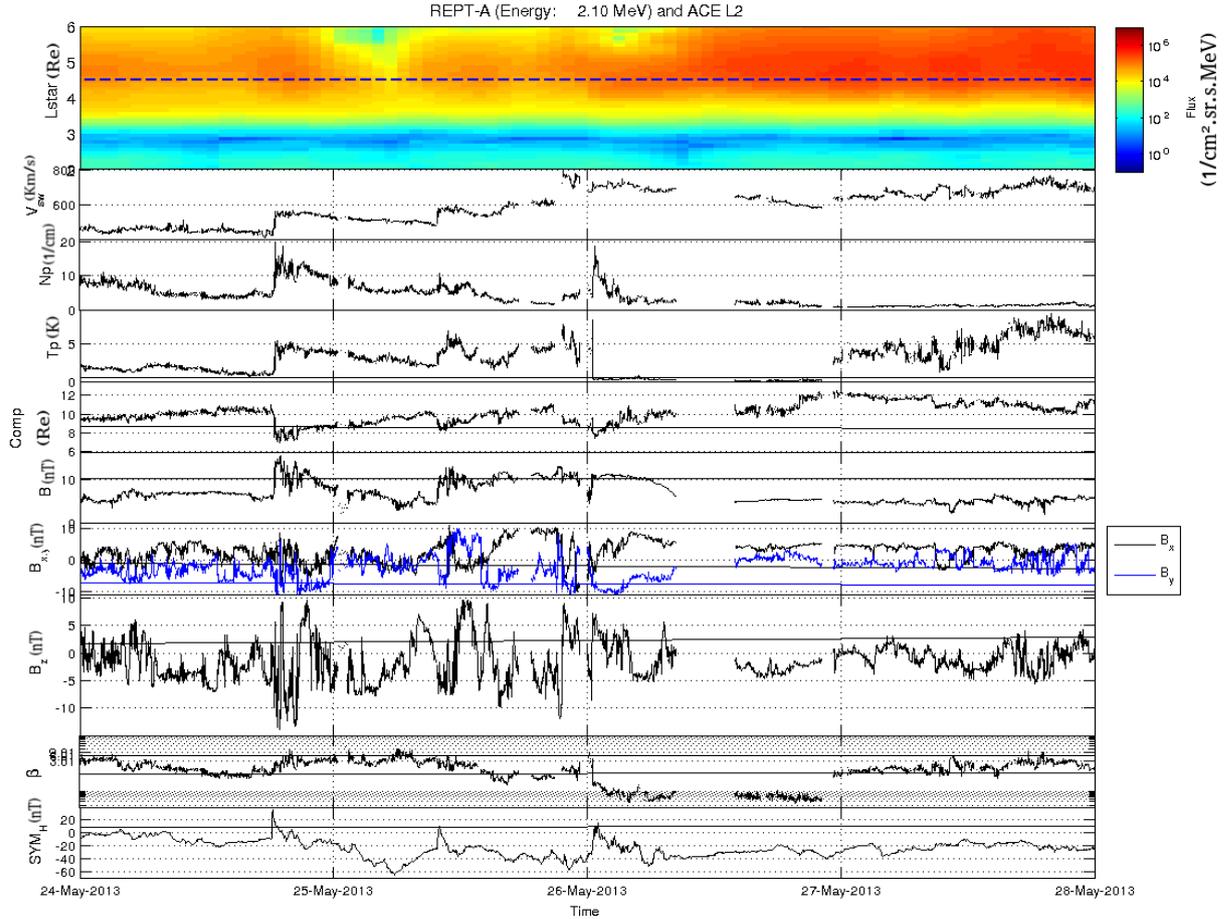


Gráfico temporal para um evento de CME no dia 25 de maio de 2013, com representação do fluxo de partículas do cinturão externo de Van Allen, para 2.1 MeV, e-flux para 5 canais de energia, ( $Bz$ ), dados em  $nT$  representados em vermelho.

Fonte: Produção do autor.

A interpretação para os parâmetros apresentados na Figura 4.8 torna-se muito difícil, requerendo a verificação de outros parâmetros dispostos na Figura 4.9 a seguir para a classificação:

Figura 4.9 - Exemplo: evento complexo



Os painéis apresentam, de cima para baixo: fluxo de elétrons na faixa de 2.1 MeV denominado  $Lstar$ ;  $V_{sw}$  velocidade do vento solar em  $km/s$ ; densidade de partículas no meio interplanetário  $Np$  em  $cm^{-3}$ ; temperatura do vento solar  $Tp$  em  $10^5 K$ ;  $Comp(Rmp)$  referente à compressão da magnetosfera em raios terrestres; no sétimo painel  $B$  em preto é a representação do campo magnético interplanetário total em  $nT$ ; logo abaixo as componentes do campo magnético interplanetário na componente  $x$  e  $y$ , representados por ( $Bx$ ) em preto e ( $By$ ) em azul forte, dados em  $nT$ ; o sétimo painel mostra a intensidade do campo magnético interplanetário na componente  $z$ , ( $Bz$ ), dados em  $nT$ , representado em vermelho; o penúltimo painel apresenta o parâmetro  $\beta$ ; o último painel mostra o índice simétrico,  $SYM_H$ , dado em  $nT$ .

Fonte: Produção do autor.

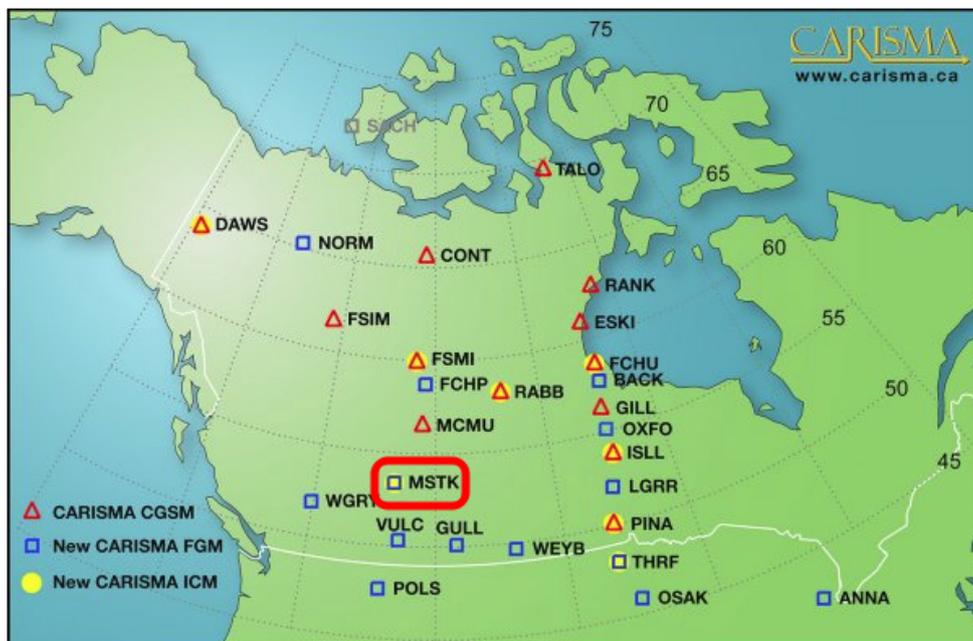
Nota-se que na noite de 24 de maio ocorre um choque com forte compressão da magnetosfera, com resposta do cinturão de radiação para valores de  $L$  altos ao passo que a magnetosfera e cinturão se recuperam. Por volta do meio dia do dia 25 de maio, uma CME atinge a magnetosfera ainda em recuperação, a qual tem características

de rotação no campo, o que a classifica como nuvem magnética. Notamos também ao final do dia 25 uma queda abrupta no parâmetro  $\beta$ , evidenciando a nuvem, visto as respostas do choque e estrutura além do tempos de resposta no cinturão. Classifica-se eventos deste caráter como eventos complexos.

#### 4.5 Interpretação gráfica de ondas ULF

Para obter dados do campo magnético terrestre, são usados dados do magnetômetro MSTK localizado em Ministik Lake, Canadá, que pode ser visualizado no mapa da Figura 4.10 abaixo, para obtenção de dados do campo magnético terrestre.

Figura 4.10 - Mapa posição geográfica MSTK



Mapa global de magnetômetros da rede CARISMA.

Fonte: Adaptado de CARISMA (2019)

Magnetômetro esse de superfície e proveniente da rede CARISMA - Canadian Array for Real Time Investigations of Magnetic Activity (MANN et al., 2008) com dados disponíveis em <http://www.carisma.ca/>. Escolha essa devido ao tipo de instrumento apresentar uma resolução temporal em segundos, o ideal para o estudo na faixa de frequências de interesse neste trabalho.

Nesse tipo de magnetômetro, Fluxgate, um núcleo ferromagnético de alta permea-

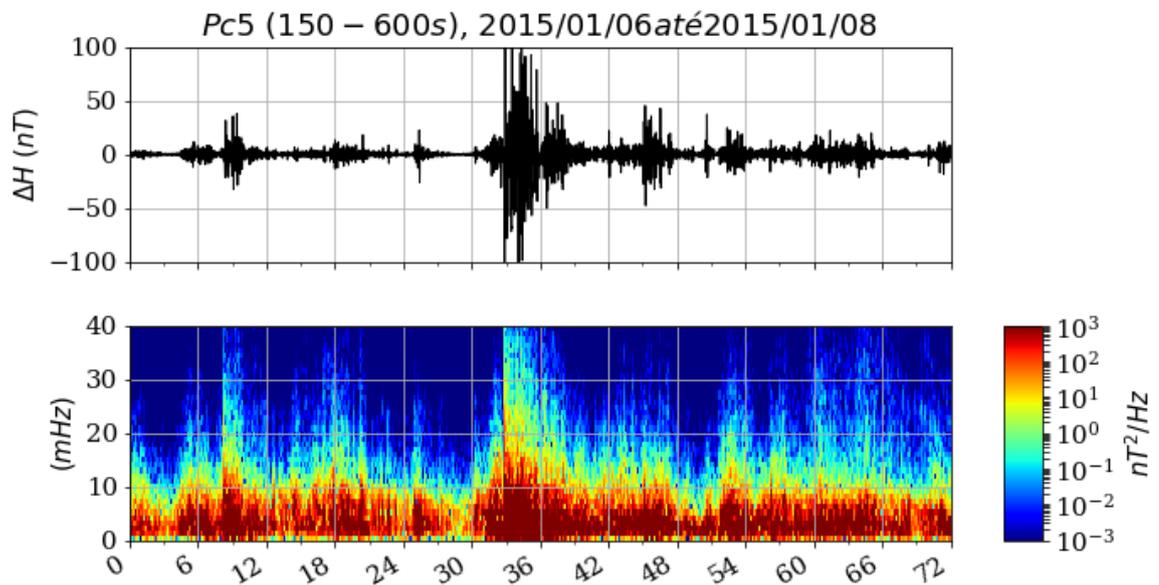
bilidade e fácil saturação é utilizado para captação e interpretação do campo no seu entorno. A posição do magnetômetro escolhido para o estudo visa captar a atividade de ondas ULF - ultra low frequency em L perto do cinturão externo. Os dados de posição de MSTK estão apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Locais e medições por posição do magnetômetro MSTK

Sigla	Nome	Latitude Géodesica	Longitude Géodesica	Latitude CCGM	Longitude CCGM	L
MSTK	Ministik Lake	53.351	247.026	60.61	307.99	4.22

Como exemplo da representação gráfica de dados é mostrada a Figura 4.11 a seguir, o período referente à tempestade intensa do dia 7 de janeiro de 2015:

Figura 4.11 - Representação da atividade de onda ULF, para tempestade do dia 07 de janeiro de 2015



Espectrogramas de dados filtrados da componente H no intervalo 150 – 600s (Pc5), representação da atividade da onda ULF, para tempestade do dia 07 de janeiro de 2015.

Fonte: Produção do autor.

No gráfico 4.11 é esboçado a componente H do campo magnético terrestre, que nada mais é que uma projeção horizontal do campo magnético da Terra no local da medição, representação essa na faixa de frequência para uma PC5. O tempo referente à zero hora indica o início do dia 06 janeiro de 2015. O marco final do período de tempo, isto é, as 72 horas, refere-se à meia-noite do dia 8 de janeiro de 2015. Nota-se forte presença de ondas ULF às 36 horas da série, referente às 12 horas do dia 7 de janeiro de 2015, instantes de tempo próximos à chegada do choque induzido pela estrutura, tabelado por Richardson e Cane (2010).

#### 4.6 Ferramentas Estatísticas de Análise

O estudo estatístico para o intervalo de tempo proposto, observado nos eventos, busca um padrão que indique fisicamente os principais parâmetros que influenciam no fluxo de elétrons para o caso específico de dropouts. Através do uso de uma ferramenta estatística a fim de quantificar o estudo enriquecendo a questão da procura de padrões físicos.

A ferramenta Estatística que melhor se encaixa para a questão é muito empregada em Física Solar e Geofísica. Conhecida como *Superposed Epoch Analysis Techniques*, ou "técnica de superposição de tempos", tem grande utilidade devido ao seu poder de comparação para longas datas. O método é bem empregado nos estudos que visam relacionar variáveis diferentes (SINGH et al., 2006). O intuito do método é mostrar que os resultados são consistentes com uma teoria ou hipótese.

A aplicação do método só pode ser empregada a eventos com algum padrão ou periodicidade. Os resultados estatísticos, ainda após o processo, devem ser analisados e comparados com a teoria para ver se tem consistência com o espaço de tempo estudado e se seguem um padrão para uma amostragem.

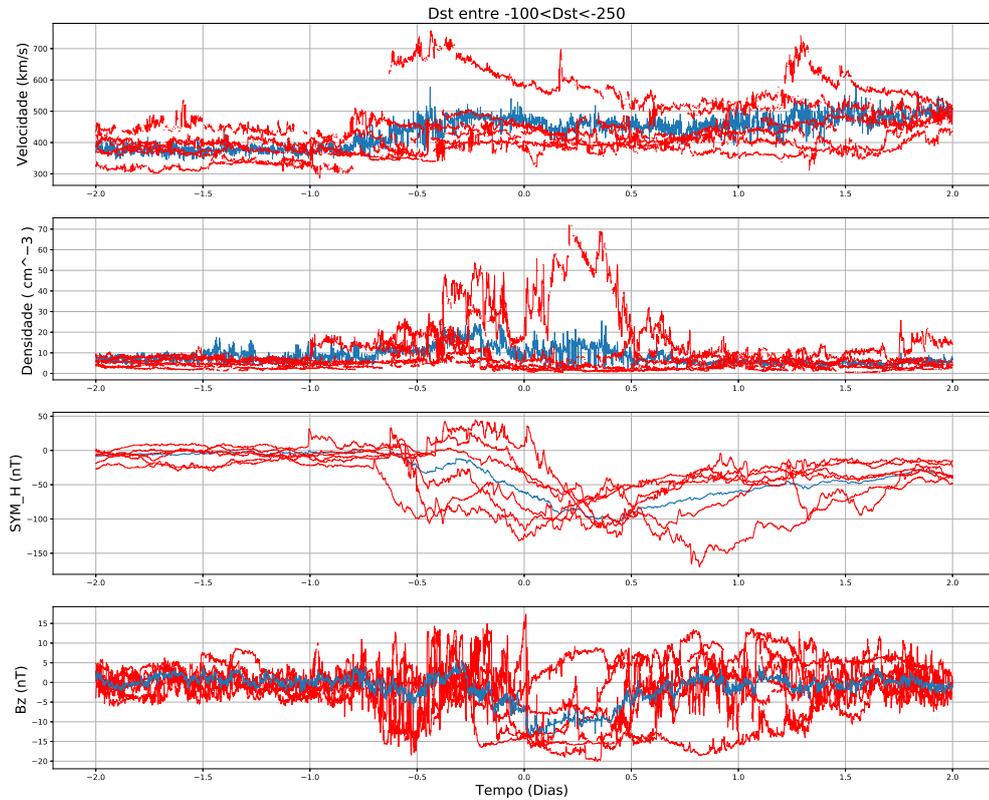
Após a análise temporal de todos os eventos, pode ser construída a tabela de Eventos dropout. Essa tabela contém uma coluna onde foi previamente estipulada a Hora Zero, fundamental na futura análise de época superposta. A escolha da Hora Zero deu-se através da avaliação no menor valor do índice Dst, disponível em <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/>, para o intervalo tabelado da CME, e respectivamente tabelado aos outros índices e parâmetros existentes na tabela de Richardson e Cane (2010).

Assim tendo estipulado a Hora Zero, optou-se por uma janela de quatro dias para os parâmetros do vento solar, índice Simétrico H e dados do cinturão de radiação

para a análise de época superposta. Na ilustração da Figura 4.12, a hora zero está centrada no segundo dia da série temporal, e fica mais evidente como funciona o cálculo do método empregado para análise.

A Figura 4.12 representa em vermelho os dados brutos para os parâmetros do meio interplanetário e índice simétrico H, já as médias pontuais calculadas através da análise de época superposta, usando média geométrica ponto a ponto está representada em azul forte. O critério utilizado para o exemplo da Figura 4.12, foi estipulado para eventos com índice Dst entre -100 nT e -250 nT tendo 7 eventos nessa janela.

Figura 4.12 - Exemplo aplicação do método de análise de época superposta



Gráficos referentes à análise de época superposta para uma janela de 4 dias, onde, na ordem de cima para baixo, tem-se: a velocidade do vento solar  $Velocidade$  em Km/s, a densidade de partículas  $Densidade$  em  $cm^{-3}$ , o índice simétrico H  $SYM_H$ , a componente  $z$  do campo magnético interplanetário  $B_z$  em  $nT$ , onde a representação em vermelho expressa os dados brutos dos eventos investigados e a série em azul, suas respectivas médias

Fonte: Produção do autor.

Na Figura 4.12 os dados brutos, para janela estudada, apresentam um tamanho em data, e número de pontos de dados iguais. Desta forma o desenvolvimento de uma rotina onde o algoritmo tire as médias para cada instante de tempo, para todos eventos de uma determinada classe a ser investigada, resulta na representação gráfica da análise de época superposta, como na Figura 4.12.

Já a análise de época para o cinturão não apresenta as mesmas condições quanto

à resolução, posição e intervalo de tempo dos dados, além de requerer algumas escolhas, para a análise estatística. Um intervalo de altura,  $L_{star}$ , que apresente pouca variação na energia da partícula da região, para não influenciar na média, além da escolha das faixas de energias que devem ser escolhidas para serem empregadas no método.

O gráfico da figura 4.13 apresenta a população de partículas no cinturão de radiação de Van Allen apenas no corte para faixa de energia de 1,8 MeV quando a órbita da sonda Van Allen Probes A estiver entre os intervalos de 5 e 5,5  $L_{star}$  em vermelho; em azul é representada sua órbita.

Figura 4.13 - Órbita e população de partículas para o intervalo de 5 e 5,5  $L_{star}$

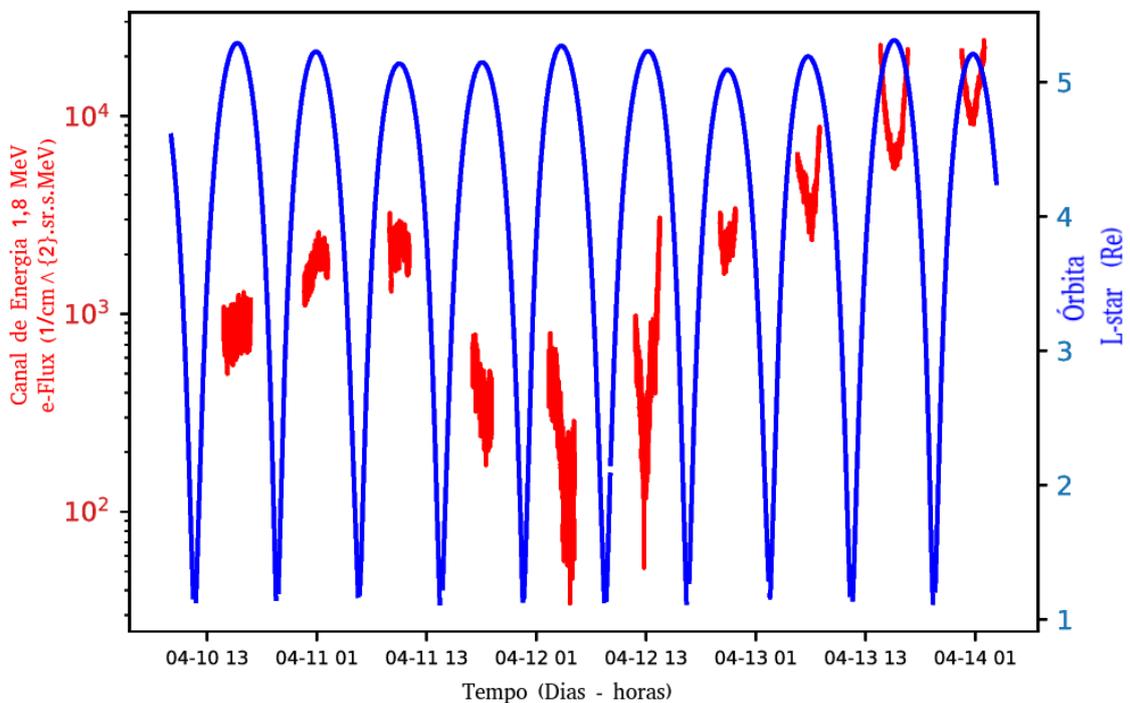


Gráfico temporal para o fluxo de partículas no cinturão de radiação, e-Flux no canal de energia de 1,8 MeV em vermelho, apenas nos instantes em que a sonda Van Allen probes A estiver entre os intervalos de 5 e 5,5  $L_{star}$ ; em azul é representada sua órbita

Fonte: Produção do autor.

Note que a variação da energia para o intervalo de altura visível a cada órbita é significativa, tendo valores da energia dentro do corte que refletem a variação da altura da órbita, o que de fato implicaria em um erro enorme ao se aplicar o método

de superposição de época, visto que as médias tem que ser pontuais, e as posições espaciais para os eventos não seriam as mesmas. Um corte com variação menor de apenas  $0,1 L_{star}$  como na Figura 4.14 indica conseqüentemente um erro menor, isso sugere uma redução no corte até variações que reflitam energias pontuais para uma altura, minimizando ao máximo o erro.

Figura 4.14 - Órbita e população de partículas para o intervalo 4,5 e 4,6  $L_{star}$

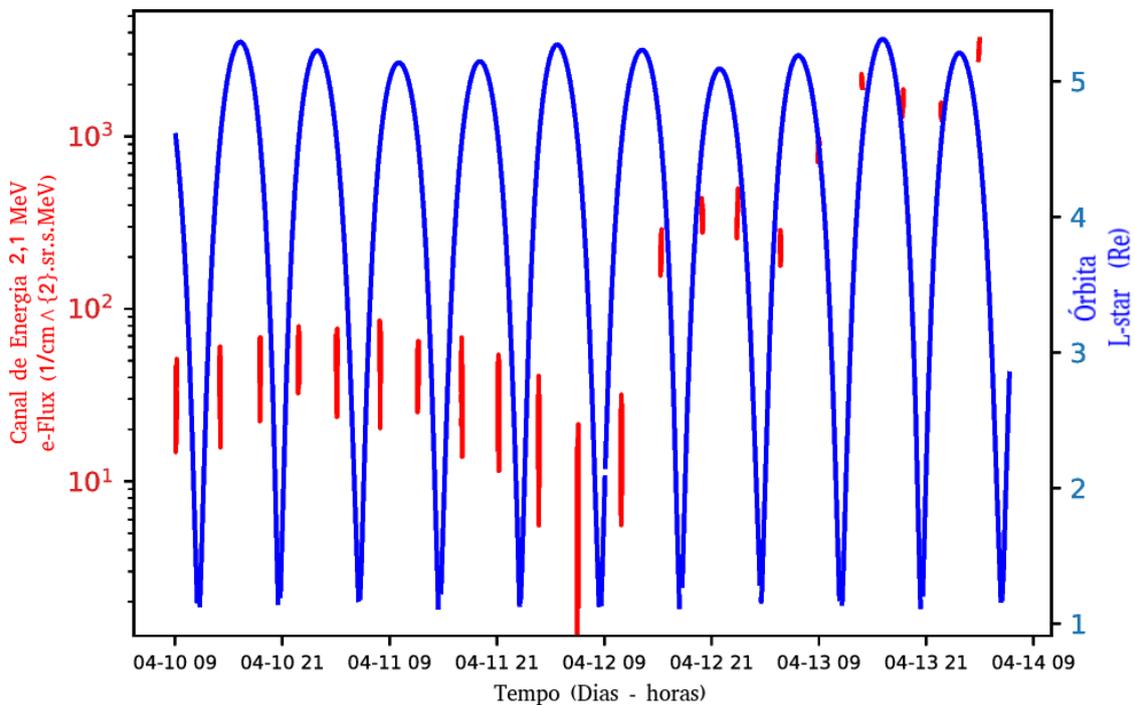


Gráfico temporal para o fluxo de partículas no cinturão de radiação, e-Flux no canal de energia 2,1 MeV em vermelho, apenas nos instantes em que a sonda Van Allen probes A estiver entre os intervalos de 4,5 e 4,6  $L_{star}$ , em azul é representada sua órbita

Fonte: Produção do autor.

Se fizermos só o plot das energias para uma classe específica em um corte pequeno tal que a energia em questão não tenha variação com a altura da órbita dentro da janela proposta para a análise de época vamos nos deparar no seguinte no gráfico da Figura 4.15.

Figura 4.15 - Análise de época pontual cinturão de radiação

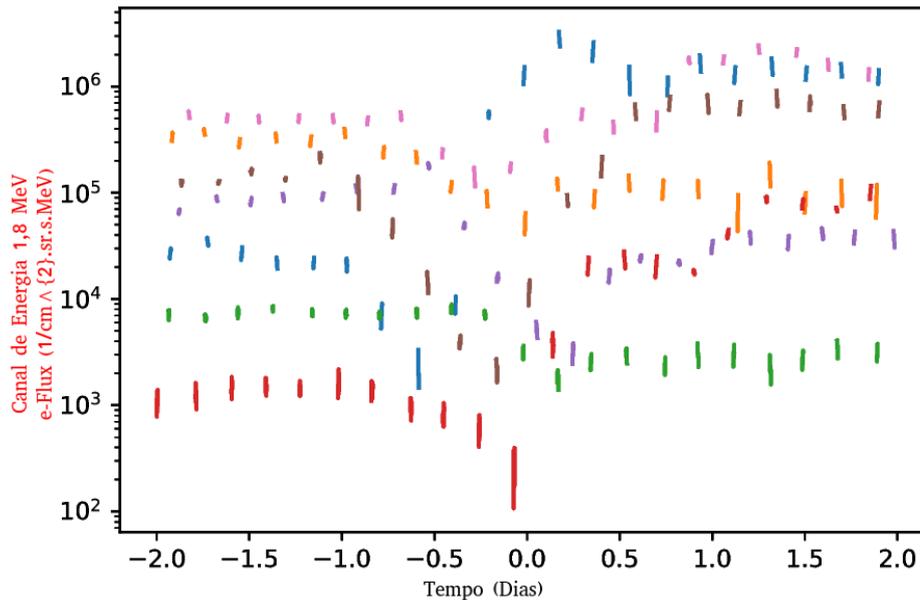


Gráfico temporal para vários eventos, distinguíveis por cor, onde todos representam o canal 1,8 MeV da sonda Van Allen A, entre o corte de 4,5 a 4,525  $L_{star}$ , em uma janela de quatro dias.

Fonte: Produção do autor.

Cada cor do gráfico da Figura 4.15 representa a energia de um evento específico, para o canal de energia 1,8MeV, entre um corte de 4,5 a 4,525  $L_{star}$ , embora a questão da janela da órbita esteja minimizada, as médias ainda não podem ser calculadas, pois para fazer a análise de época, é preciso tomar as médias pontuais e de mesmo tamanho, impossibilitadas uma vez que os eventos são ordenados pelo Tempo Zero que não coincidem com os instantes de tempo dos cortes para a órbita, além de não terem o mesmo número de pontos.

Para resolver a questão então é interpolado cada evento com o tamanho estipulado pela análise de época, forçando cada evento a ter o mesmo número de pontos de dados, em intervalos de tempos iguais, assim podendo tirar as médias pontuais para todos eventos de uma determinada classe a ser investigada, como na Figura 4.16 a seguir.

Figura 4.16 - Análise de época e interpolação de dados

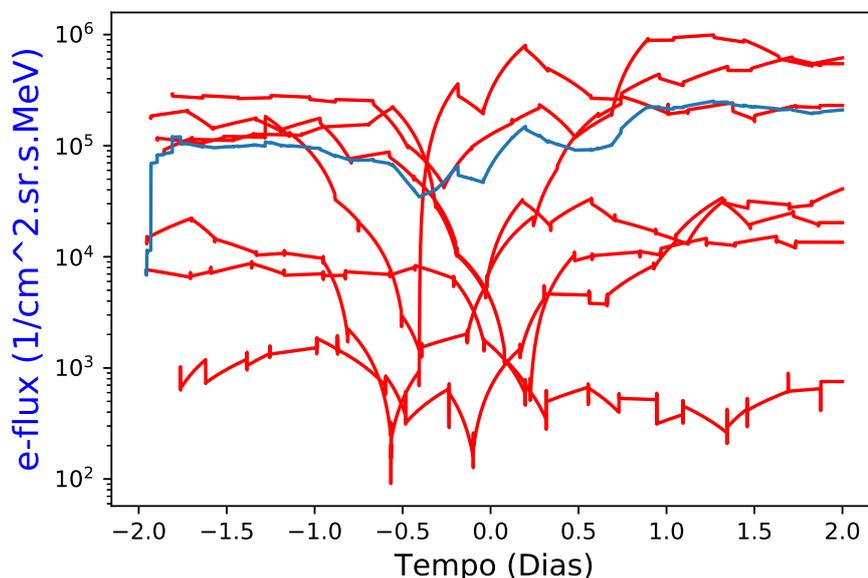


Gráfico temporal para sete eventos apresentados em vermelho pelos dados brutos e em azul pela média calculada através da análise de época superposta, referente ao fluxo de partículas no cinturão de radiação; e-flux no canal de energia de 1,8 MeV da sonda Van Allen A, entre o corte de 4,9 a 4,92  $L_{star}$ , em uma janela de quatro dias.

Fonte: Produção do autor.

Para as variáveis empregadas na análise de época superposta, visíveis na seção 5, foi calculado o desvio padrão pontual  $\sigma$  por:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (4.1)$$

onde:  $x_i$  é o valor na posição  $i$  no conjunto de dados;  $\bar{x}$  média aritmética dos dados; e  $n$  quantidade de dados.

Os dados calculados através de  $\sigma$  para a densidade do vento solar, que apresentaram valores negativos foram considerados como zero. Os dados referentes ao cinturão não foram esboçados graficamente por concorrerem com informações de outras energias ilustradas no mesmo painel gráfico, dificultando a visualização e entendimento.



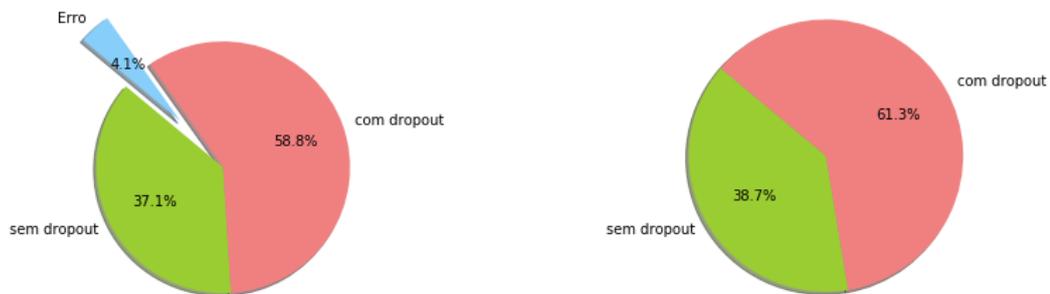
## 5 RESULTADOS

Os resultados são apresentados em três subseções: Na Subseção 5.1 Dropout são apresentados os resultados referentes à separação em duas classes: com e sem dropout, onde são feitas observações quanto ao tipo de estrutura interplanetária e intensidade do dropout, sempre comparando uma com a outra, além da apresentação da análise de época superposta. A mesma lógica é apresentada na Subseção 5.2 Nuvens, cuja classificação se dá pela rotação das componentes  $B_z$  ou  $B_y$ . Na terceira Subseção 5.3 Recuperação dropout a análise é feita levando-se em conta a recuperação do cinturão (reestabelecimento da densidade de elétrons) se deu do forma rápida ou lenta.

### 5.1 Dropout

Dentro do período estudado e seguindo a metodologia para os 97 eventos, foram obtidos 4 eventos com problemas em dados, sejam do meio interplanetário ou do cinturão de radiação. Dos 93 restantes, 57 foram classificados com ocorrência de dropout e 36 sem ocorrência de dropout, como ilustra a Figura 5.1.

Figura 5.1 - Gráfico que quantifica a ocorrência de dropout para todos eventos estudados.



Em azul, na primeira ilustração gráfica dos eventos são destacados os que apresentaram algum tipo de erro e falta de dados para as análises futuras. Em verde os eventos sem dropout e em rosa os eventos com dropout. O gráfico em pizza à direita apresenta as porcentagens tirando os eventos com erros nos dados.

Fonte: Produção do autor.

As datas referentes a ICMEs que não tiveram dropout são apresentados na Tabela 5.1 abaixo:

Tabela 5.1 - Tabela eventos classificados sem dropout.

Dst data	dV	V ICME	V	B nT	MC	Nuvem Tipo	Dst nT
2012/10/13/08	40	490	530	11	2	S-N	-90
2012/11/09/23	0	370	380	2	1	I	1
2012/11/24/10	70	380	410	12	1	I	-40
2012/11/26/02	90	450	530	6	0	I	-8
2012/11/28/08	20	360	380	4	0	I	-1
2012/12/14/11	30	330	330	7	2	N-S	9
2013/01/19/14	40	430	460	5	1	I	-25
2013/02/14/08	20	360	400	4	0	I	-37
2013/02/17/21	60	360	410	7	1	I	-40
2013/03/20/18	110	520	640	9	1	I	-39
2013/04/15/11	100	410	520	9	2	N-S	-6
2013/06/08/03	20	430	450	3	1	I	-20
2013/08/23/03	40	470	570	6	1	I	-40
2013/08/25/23	30	400	520	4	1	I	-29
2013/12/01/05	50	450	540	9	2	f	-22
2013/12/16/07	30	460	500	7	2	f	-23
2014/02/06/14	50	370	400	7	0	I	-31
2014/02/11/23	60	430	560	6	1	I	-24
2014/02/17/12	0	400	410	6	1	I	-27
2014/02/20/05	180	490	690	6	0	I	-95
2014/04/19/07	0	490	500	8	0	I	-19
2014/04/20/01	30	510	530	5	1	I	-14
2014/04/21/15	200	540	700	6	1	I	-32
2014/09/17/02	0	310	320	9	1	I	-18
2014/11/11/05	50	480	520	9	0	I	-65
2015/03/16/08	30	420	440	11	0	I	16
2015/03/29/20	20	360	390	6	0	I	-28
2015/03/31/08	40	400	420	13	2	S-N	-2
2015/05/07/07	0	390	400	6	0	I	-8
2015/07/13/16	40	490	650	8	0	I	-61
2015/08/08/12	10	510	560	9	0	I	-25
2015/09/13/18	10	460	480	5	0	I	-38
2015/10/27/13	60	430	490	7	1	I	-7
2016/01/24/06	30	410	490	5	1	I	-10
2016/03/20/22	20	400	430	7	1	I	-42
2016/11/04/08	0	350	360	4	0	I	-17

Na Tabela 5.1, a coluna **Dst data** refere-se à data e hora do valor mínimo do índice Dst, apontado na coluna **Dst nT**, no formato AAAA/MM/DD/HH, onde AAAA indica ano, MM indica o mês, DD refere-se ao dia, HH para a hora. A coluna **V ICME** aponta a média da velocidade do vento solar momentos antes do choque da estrutura dado em  $Km/s$ , os valores de **V** indicam o maior valor da velocidade do vento solar durante a perturbação dada em  $Km/s$ , **dV** indica a variação na velocidade do vento solar em  $Km/s$ . A coluna **B (nT)** contém os valores da intensidade média do campo magnético da ICME, com base no intervalo que precede a estrutura. **MC**, refere-se à identificação da estrutura de Nuvem Magnética da ICME, onde '2' indica que os dados do meio interplanetário mostram características claras de uma estrutura de nuvem magnética, com clara rotação em uma de suas componentes  $B_z$  ou  $B_y$ , porém não garante categoricamente ser uma nuvem magnética, '1' indica que a ICME apresenta evidências de uma rotação em uma de suas componentes  $B_z$  ou  $B_y$  do campo magnético interplanetário, mas faltam algumas características de uma nuvem magnética, '0' indica que os dados do meio interplanetário indicam uma ICME, mas sem a estrutura de nuvem magnética. A coluna **Nuvem Tipo** classifica as ICMEs de acordo com a polaridade da rotação da nuvem magnética usando os critérios definidos na metodologia em quatro tipos: N-S (rotação da componente  $B_z$  de Norte para Sul); S-N (rotação da componente  $B_z$  de Sul para Norte); Y-S (rotação da componente  $B_y$  e componente  $B_z$  Sul); 'I' mostra a não identificação da nuvem magnética e 'f' indica que o evento não pode ser classificado devido à falta de dados.

Nota-se que as estruturas onde não se verificou ocorrência simultânea de *dropout* tiveram em média uma intensidade muito baixa no índice Dst, o que explicaria a baixa variação no fluxo de elétrons na região, no período do evento. Um ponto importante de ressaltar é que para os 36 eventos sem *dropout* apenas 6 eventos foram classificados segundo Richardson e Cane (2010) como tendo características de nuvem magnética, dos quais duas se encaixam no critério de nuvem N-S e duas no critério S-N, os outros dois eventos ocorridos em 01 e 16 de dezembro de 2013 não se encaixam com os 3 tipos de nuvens, pré estipuladas na metodologia para serem analisados.

Os 57 eventos onde ocorreu *dropout* estão listados na Tabela 5.2 a seguir. Os parâmetros apresentados na Tabela 5.2 são os mesmos da Tabela 5.1:

Tabela 5.2 - Tabela eventos classificados com *dropout*.

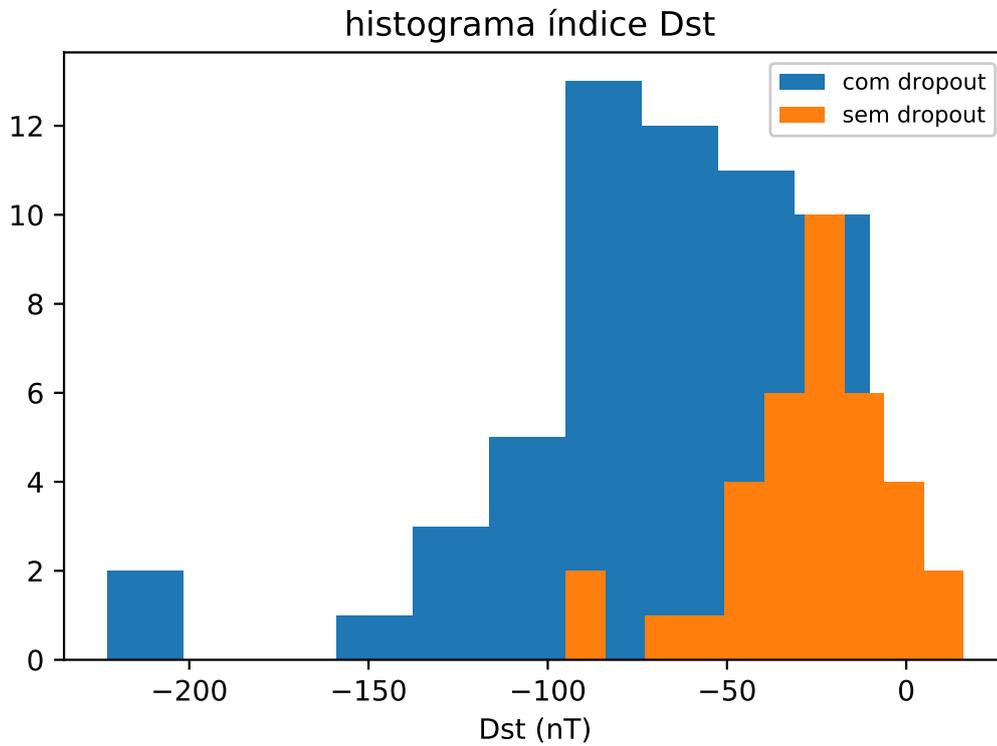
<b>Dstdata</b>	<b>dV</b>	<b>VICME</b>	<b>V</b>	<b>BnT</b>	<b>MC</b>	<b>NuvemTipo</b>	<b>DstnT</b>
2012/10/09/09	70	390	420	16	2	Y-S	-107
2012/11/01/21	30	340	370	11	2	Y-S	-65
2012/11/14/08	50	380	460	21	2	N-S	-108
2013/01/17/24	0	390	400	12	2	S-N	-52
2013/03/17/21	230	520	720	9	2	N-S	-132
2013/04/30/09	50	400	430	10	2	S-N	-47
2013/05/01/19	30	430	460	10	1	N-S	-72
2013/05/25/07	140	660	750	7	0	I	-47
2013/06/07/02	30	430	510	11	2	S-N	-78
2013/06/29/07	70	390	450	10	2	N-S	-102
2013/06/06/01	10	350	370	10	2	N-S	-87
2013/07/14/23	60	430	500	13	2	N-S	-81
2013/08/21/06	30	460	470	7	1	I	-26
2013/10/02/08	220	470	630	7	2	S-N	-72
2013/12/25/14	30	300	330	11	2	Y-S	-35
2013/10/09/02	100	480	650	6	0	I	-69
2013/11/09/08	0	420	460	12	2	S-N	-80
2013/11/11/07	0	460	480	7	1	I	-30
2014/02/09/02	110	420	460	9	2	S-N	-39
2014/02/16/12	100	380	450	15	2	S-N	-24
2014/02/18/09	60	400	410	8	1	I	-67
2014/02/19/03	60	520	530	11	2	S-N	-119
2014/04/12/09	10	350	380	5	2	Y-S	-86
2014/04/30/10	0	310	320	9	2	Y-S	-67
2014/06/08/23	60	480	610	9	0	I	-37
2014/08/19/22	40	360	440	17	2	S-N	-28
2014/09/12/23	230	600	720	20	2	N-S	-88
2014/12/22/06	70	380	430	16	2	S-N	-71
2015/01/02/22	20	390	450	8	1	I	-42
2015/01/04/16	10	430	460	9	1	N-S	-62
2015/01/07/11	30	450	470	16	2	S-N	-99
2015/03/17/23	90	560	620	20	2	S-N	-223

Tabela 5.2 - Conclusão.

<b>Dstdata</b>	<b>dV</b>	<b>VICME</b>	<b>V</b>	<b>BnT</b>	<b>MC</b>	<b>NuvemTipo</b>	<b>DstnT</b>
2015/03/22/15	70	640	700	8	0	I	-43
2015/03/28/09	10	390	420	13	2	N-S	-29
2015/05/06/19	80	420	470	13	2	S-N	-28
2015/05/10/15	0	370	400	11	2	N-S	-51
2015/05/18/05	40	460	480	16	2	S-N	-44
2015/06/23/05	190	610	740	14	1	S-N	-204
2015/06/25/15	170	550	720	5	0	I	-86
2015/06/26/06	50	490	560	5	1	I	-57
2015/08/16/08	10	500	510	12	1	S-N	-84
2015/08/27/21	20	370	420	11	1	I	-92
2015/09/08/10	190	460	600	15	2	N-S	-94
2015/09/21/21	120	510	600	5	0	I	-75
2015/11/04/13	70	640	740	8	1	I	-60
2015/11/07/07	90	500	680	13	2	S-N	-89
2015/12/20/23	110	400	490	15	2	Y-N	-155
2016/01/01/01	90	440	480	10	2	S-N	-117
2016/01/20/19	70	370	400	14	2	S-N	-93
2016/04/14/21	30	420	480	8	1	I	-59
2016/04/17/09	0	400	440	5	1	I	-25
2016/07/20/07	110	440	570	10	2	S-N	-23
2016/07/24/11	50	430	450	7	2	N-S	-34
2016/07/26/21	0	370	390	4	0	I	-10
2016/08/03/11	10	420	460	20	2	S-N	-14
2016/10/13/18	80	490	460	19	2	Y-N	-104
2016/11/10/18	50	360	370	11	2	N-S	-59

As estruturas relacionadas aos *dropout* foram em grande maioria identificadas como sendo nuvens magnéticas, onde 21 foram classificadas com S-N, 13 classificadas como N-S e 7 como Y-S, 16 eventos apresentaram a não ocorrência de nuvem. A média apresentada pelo índice Dst é expressivamente maior do que a média para eventos que não apresentaram *dropout* visto pela Tabela 5.3, atingindo valor médio aproximadamente 2,7 vezes maior, evidenciado pelo histograma da Figura 5.2.

Figura 5.2 - Histograma índice Dst, eventos com *dropout* e sem *dropout*.



Histograma índice Dst, eventos com *dropout* e sem *dropout* .

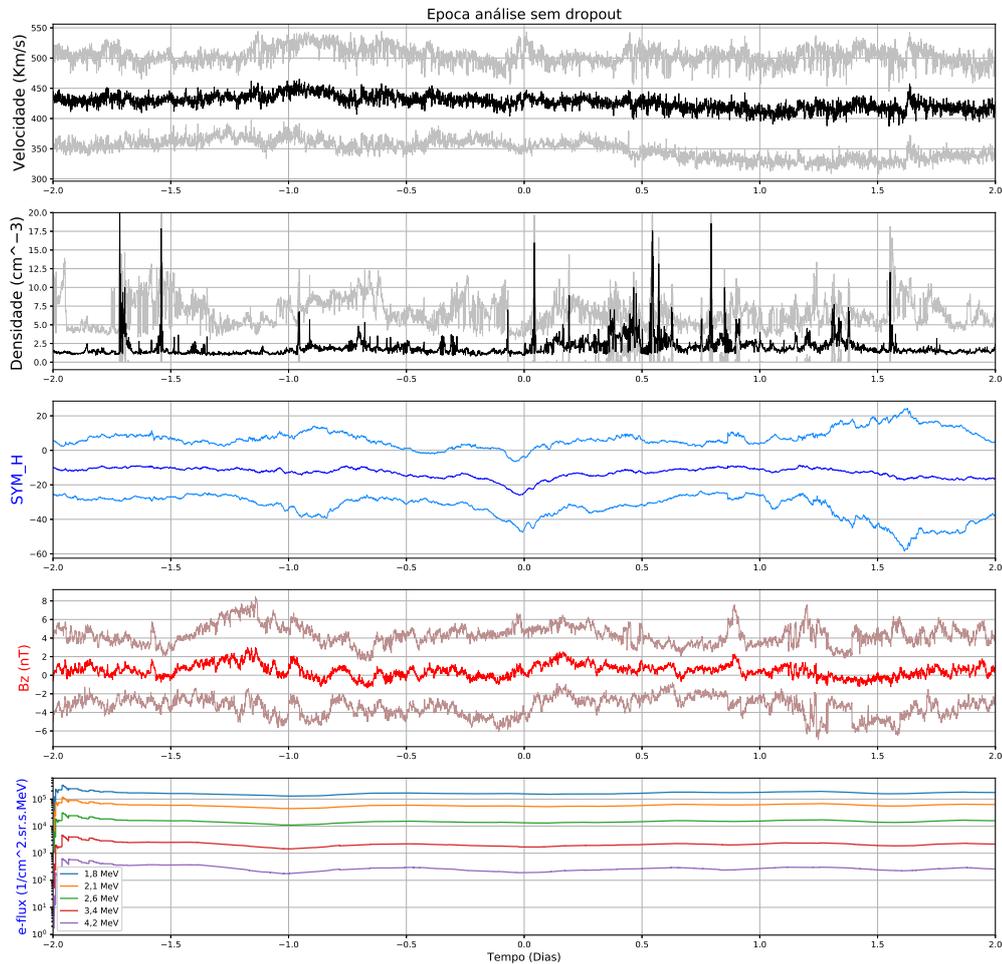
Fonte: Produção do autor.

Tabela 5.3 - Média índice Dst, eventos com *dropout* e sem *dropout*.

<i>dropout</i>	Média Dst <i>nT</i>
sem <i>dropout</i>	-26,58
com <i>dropout</i>	-71,42

Através da separação dos eventos nas classes: com *dropout* e sem *dropout*, estipulou-se uma janela de 4 dias para cada evento para a análise de época superposta, com o tempo zero centrado no valor mínimo do índice Dst, cujos resultados são apresentados nas Figuras 5.3 e 5.4.

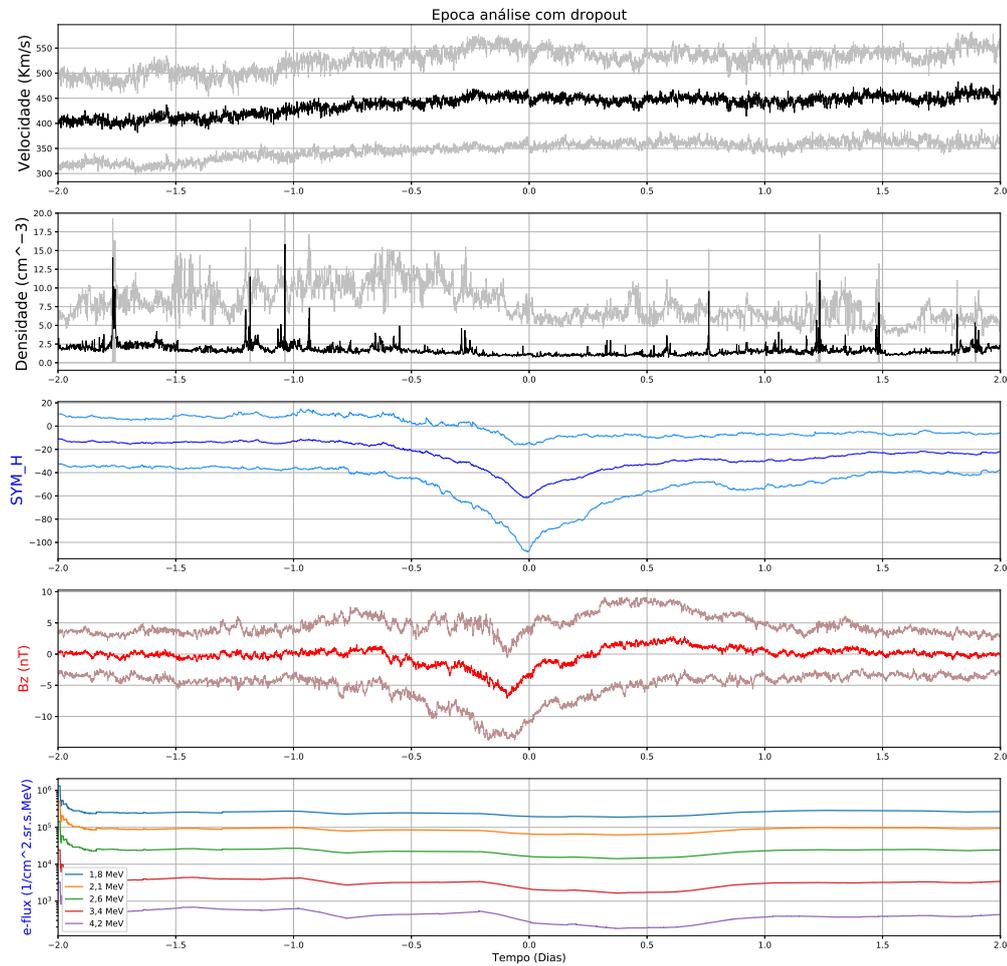
Figura 5.3 - Análise de época superposta, para eventos sem *dropout*.



Gráficos referentes à análise de época superposta para uma janela de 4 dias, com a amostra de todos os eventos classificados sem ocorrência de *dropout*, aplicado as médias para as variáveis do vento solar, índice Simétrico H, e fluxo de elétrons no cinturão de radiação. Na ordem de cima para baixo tem-se: a representação da velocidade do vento solar *Velocidade* em Km/s, densidade de partículas *Densidade* em  $cm^{-3}$ , índice simétrico H  $SYM_H$  a componente z do campo magnético interplanetário  $Bz$  em nT todas com seus respectivos desvios padrões em cor mais clara que a média. Por último, é inferido a média para e-flux referente à variação do fluxo de partículas, dado em  $1/cm^2.sr.s.MeV$ , para os respectivos cinco níveis de energia, 1,8MeV em azul, 2,1MeV em amarelo, 2,6MeV em verde, 3,4MeV em vermelho e 4,2 MeV em lilás.

Fonte: Produção do autor.

Figura 5.4 - Análise de época superposta, para eventos com *dropout*.



Gráficos referentes à análise de época superposta para uma janela de 4 dias, com a amostra de todos os eventos classificados com ocorrência de dropout, aplicado às médias para as variáveis do vento solar, índice Simétrico H, e fluxo de elétrons no cinturão de radiação. Na ordem de cima para baixo tem-se a representação da velocidade do vento solar *Velocidade* em Km/s, densidade de partículas *Densidade* em  $cm^{-3}$ , índice simétrico H *SYM<sub>H</sub>* a componente z do campo magnético interplanetário *Bz* em nT, todas com seus respectivos desvios padrões em cor mais clara que a média. Por último, é inferido a média para e-flux referente à variação do fluxo de partículas, dado em  $1/cm^2.sr.s.MeV$ , para os respectivos cinco níveis de energia, 1,8MeV em azul, 2,1MeV em amarelo, 2,6MeV em verde, 3,4MeV em vermelho e 4,2 MeV em lilás.

Fonte: Produção do autor.

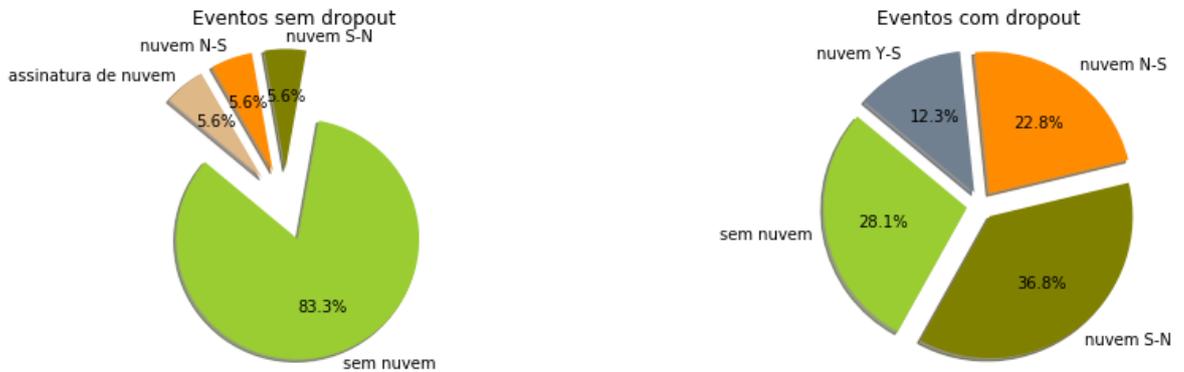
Os gráficos da Figura 5.3, mostram a análise de época superposta de todos os eventos que foram classificados como sem *dropout*, listados na Tabela 5.1. Já os os gráficos da Figura 5.4 mostram a análise de época superposta de todos os eventos classificados como com *dropout*, listados na Tabela 5.2. Através da comparação gráfica da Figura 5.4 com a Figura 5.3, notamos que os eventos com *dropout* se mostraram mais intensos observando o índice SYM-H. A assinatura marcada pela análise de época, em SYM-H, apresenta características compatíveis com a ocorrência de tempestade geomagnética, como esperado, uma vez que o Tempo Zero foi escolhido pelo menor valor do índice Dst para o período do evento, onde as médias da análise de época se enquadrariam em tempestades moderadas, para eventos com *dropout*, e tempestades fracas, para os eventos sem *dropout*, pela classificação de intensidade de tempestades geomagnéticas de Mendes (1992), Gonzalez et al. (1994).

Os parâmetros do meio interplanetário apresentaram pouca assinatura de choque e tempestade para a categoria sem *dropout*, já os eventos com *dropout* esboçaram alguma variação na velocidade do vento solar, com aumento gradativo de aproximadamente  $50\text{km/s}$ , estabilizado a partir do tempo zero, a densidade mostrou-se extremamente instável antes do pico da tempestade. A componente  $z$  do campo magnético interplanetário  $B_z$  foi o parâmetro do meio que mais se destacou quanto às variações, com uma variação de aproximadamente  $7\text{nT}$ . A variação no fluxo de elétrons para análise de época referente ao cinturão externo, para eventos sem *dropout*, é imperceptível. Situação diferente ocorre para a classe de eventos com *dropout*, com variação sutil, mas é possível notar que perto do Tempo Zero ocorre uma queda e uma recuperação, no período de um dia, para todos níveis de energia, mais notáveis visualmente para energias acima de  $2.10\text{MeV}$ , por uma questão de escala gráfica.

## 5.2 Nuvem Magnéticas

Levando-se em conta a classificação das ICMEs quanto ao tipo de rotação nas componentes  $B_y$  e  $B_z$  do campo magnético interplanetário, a fim de descobrir se existe alguma preferência quanto a ocorrência de *dropout*, a investigação através das categorias separadas nas Tabelas 5.1 e 5.2 podem ser expressas pelos gráficos da Figura 5.5:

Figura 5.5 - Gráfico referente à classificação quanto ao tipo de nuvem magnética e ocorrência de *dropout*.



Os gráficos em forma de pizza se referem a eventos sem *dropout*, a esquerda e com *dropout* à direita. A quantificação da porcentagem é separada pelo critério de nuvem magnética estipulado na metodologia. Em verde claro são ilustrados os eventos sem nuvem magnética, em verde escuro os eventos com nuvem S-N, em laranja os eventos N-S, em azul forte os eventos Y-S.

Fonte: Produção do autor.

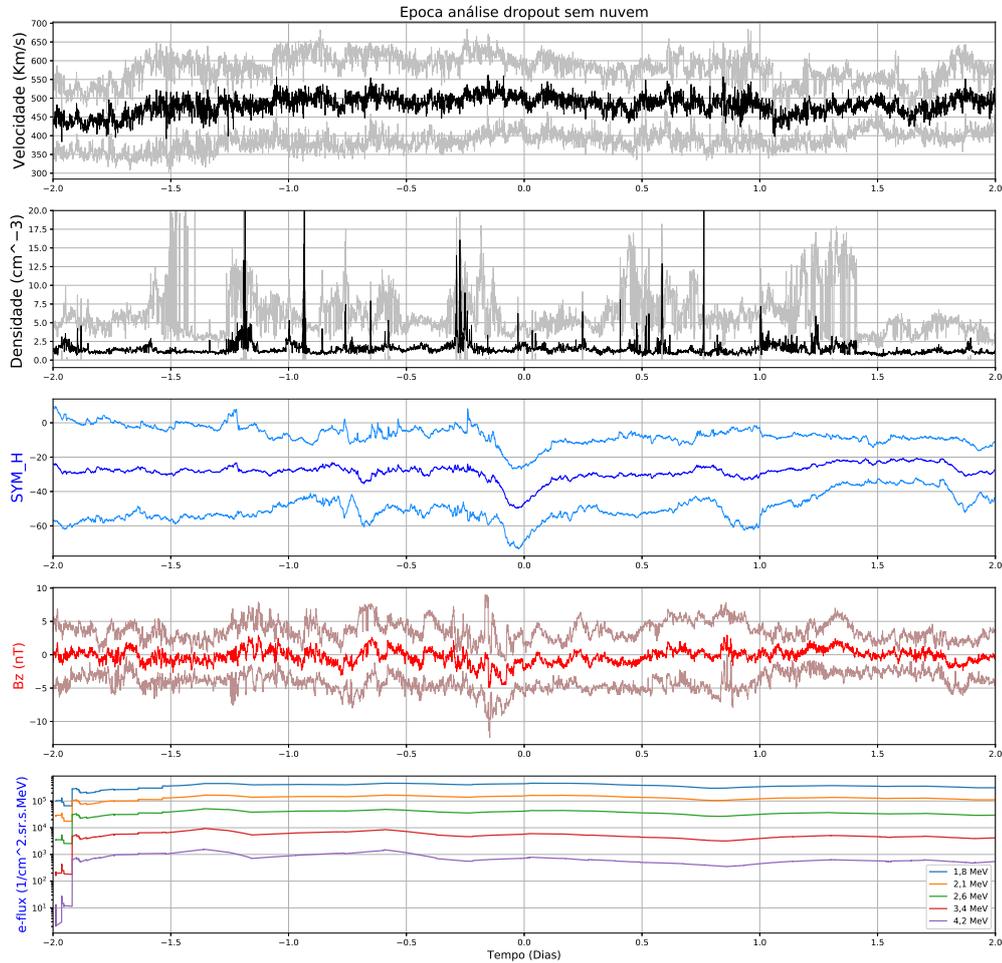
Notamos a partir da análise gráfica da Figura 5.5 que, para o intervalo estudado a ocorrência de *dropout* está fortemente ligada ao tipo de estrutura, notamos que as ICMEs que não acarretaram em perturbações que geraram *dropout* tem em sua maioria a ausência de nuvem magnética, cerca de 83% dos eventos sem nuvem chegando até próximo de 90% visto que na fatia assinatura de nuvem em marrom não foi possível classificar ou identificar o tipo de nuvem.

Já os eventos com *dropout* estão associados à nuvem magnética em cerca de 72%. É importante ressaltar que dentro dos 28% em que não foram identificados características de nuvens, isto é 16 eventos, 13 mostraram ser complexos. Essa complexidade se deve a perturbações singulares ou outro tipo de estrutura causadora dos distúrbios ou até eventos simultâneos as datas de ocorrência, sugerindo uma perturbação inicial na magnetosfera antes da chegada da ICME, enquadrando-se em uma nova classificação, apresentada na seção seguinte como evento complexo Tabela 5.6 e tendo relação direta com o cinturão de radiação.

Através da respectiva separação quanto ao tipo de nuvem, estipulou-se uma janela

de 4 dias para cada evento. Para ser feita a análise de época superposta, com o tempo zero centrado no valor mínimo do índice Dst. A escolha dos critérios seguiu a metodologia apresentada na seção anterior, tendo como resultado as Figuras 5.6 , 5.7, 5.8 e 5.9 .

Figura 5.6 - Análise de época superposta, para eventos com *dropout* e sem nuvem.

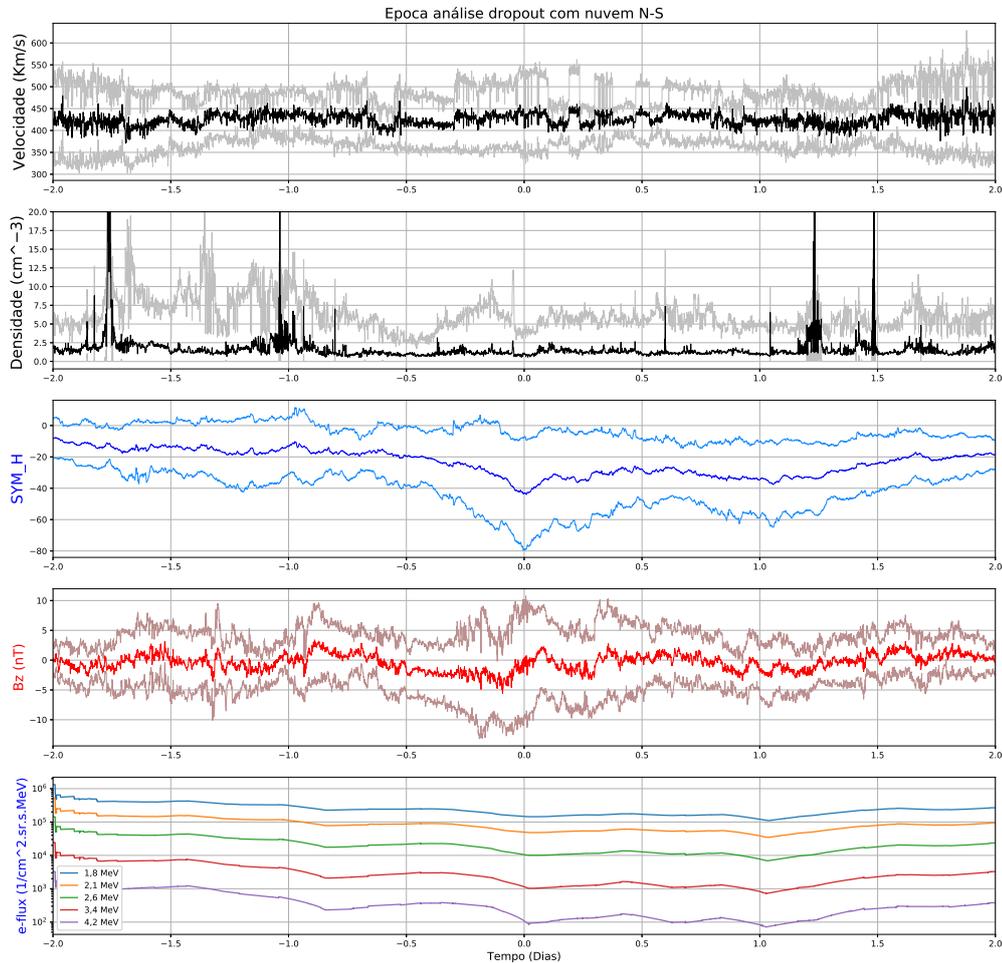


Gráficos referentes à análise de época superposta para uma janela de 4 dias, com a amostra de todos os eventos classificados com ocorrência de dropout e sem nuvem onde, na ordem de cima para baixo, tem-se a velocidade do vento solar *Velocidade* em Km/s, a densidade de partículas *Densidade* em  $cm^{-3}$ , o índice simétrico H *SYM<sub>H</sub>* a componente z do campo magnético interplanetário *B<sub>z</sub>* em nT todas com seus respectivos desvios padrões em cor mais clara que a média. Por último, é inferida a média para e-flux referente à variação do fluxo de partículas, dado em  $1/cm^2.sr.s.MeV$ , para os respectivos cinco níveis de energia, 1,8MeV em azul, 2,1MeV em amarelo, 2,6MeV em verde, 3,4MeV em vermelho e 4,2 MeV em lilás.

Fonte: Produção do autor.

Pode-se notar na Figura 5.6 que os parâmetros do meio interplanetário apresentaram, em média, pouca assinatura de choque e tempestade para a categoria sem *dropout* e nuvem magnética, marcada pela análise de época, onde as médias sugerem características de períodos calmos no meio interplanetário e cinturão de radiação. Destaque para o Tempo Zero no SYM-H, que apresenta características compatíveis com a ocorrência de tempestade geomagnética, onde as médias da análise de época se enquadra em tempestades fracas, podendo chegar a tempestades moderadas pela variação do desvio padrão.

Figura 5.7 - Análise de época superposta, para eventos com *dropout* classificados com Nuvem N-S.



Gráficos referentes à análise de época superposta para uma janela de 4 dias, com a amostra de todos os eventos classificados com ocorrência de dropout classificados como nuvens N-S onde, na ordem de cima para baixo, tem-se a velocidade do vento solar *Velocidade* em Km/s, a densidade de partículas *Densidade* em  $cm^{-3}$ , o índice simétrico H  $SYM_H$  a componente  $z$  do campo magnético interplanetário  $B_z$  em  $nT$  todas com seus respectivos desvios padrões em cor mais clara que a média. Por último, é inferida a média para e-flux referente à variação do fluxo de partículas, dado em  $1/cm^2.sr.s.MeV$ , para os respectivos cinco níveis de energia, 1,8MeV em azul, 2,1MeV em amarelo, 2,6MeV em verde, 3,4MeV em vermelho e 4,2 MeV em lilás.

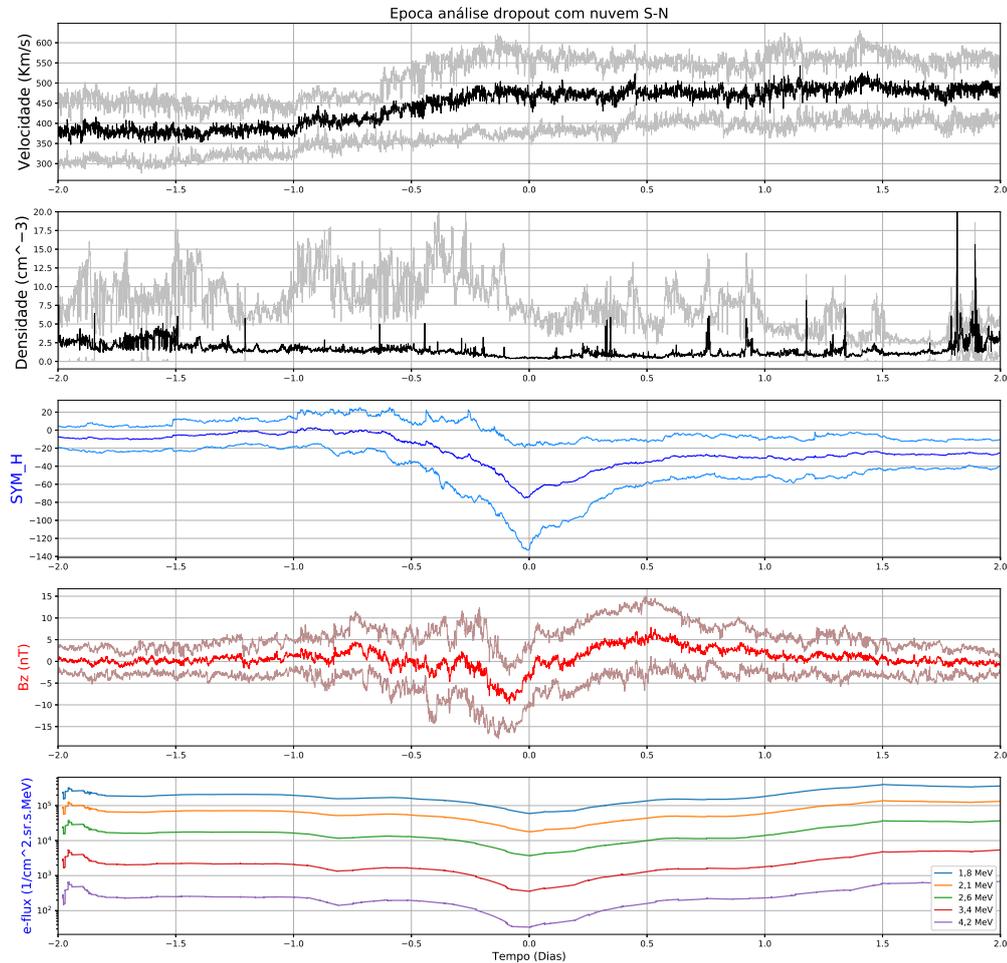
Fonte: Produção do autor.

Eventos com *dropout* e nuvem na classe N-S, representados na Figura 5.7, esboçaram, em média, pouca variação na velocidade do vento solar, apresentando pequenas flutuações entre  $400\text{km/s}$  e  $450\text{km/s}$  para todo período, a densidade mostrou a presença de picos, que precedem e antecedem um dia do Tempo Zero, além de apresentar estabilidade no entorno do Tempo Zero.

SYM-H atinge pouco menos de  $-40nT$  com recuperação lenta compatível com a ocorrência de Nuvem magnética. Notável uma alta flutuação do campo magnético interplanetário  $B_z$  perto de  $10nT$  que se mostra instável. O desvio padrão aponta uma incerteza muito variável na linha do tempo para essa grandeza, totalmente compreensível visto que eventos classificados como nuvens possuem tempos de interação com a magnetosfera e intensidade na componente  $z$  diferentes (DAL LAGO et al., 1999).

A variação no fluxo de elétrons para análise de época referente ao cinturão externo, é sutil e gradual, mas nota-se que perto do Tempo Zero ocorre queda com um patamar estável de um dia para esse mesmo período.

Figura 5.8 - Análise de época superposta, para eventos com *dropout* classificados com Nuvem S-N.



Gráficos referentes à análise de época superposta para uma janela de 4 dias, com a amostra de todos os eventos classificados com ocorrência de dropout classificados como nuvens S-N onde, aplicando as médias para as variáveis do vento solar, índice Simétrico H, e fluxo de elétrons no cinturão de radiação. Na ordem de cima para baixo tem-se a representação da velocidade do vento solar  $Velocidade$  em Km/s, densidade de partículas  $Densidade$  em  $cm^{-3}$ , índice simétrico H  $SYM_H$  a componente z do campo magnético interplanetário  $Bz$  em nT todas com seus respectivos desvios padrões em cor mais clara que a média. Por último, é inferida a média para e-flux referente à variação do fluxo de partículas, dado em  $1/cm^2.sr.s.MeV$ , para os respectivos cinco níveis de energia, 1,8MeV em azul, 2,1MeV em amarelo, 2,6MeV em verde, 3,4MeV em vermelho e 4,2 MeV em lilás.

Fonte: Produção do autor.

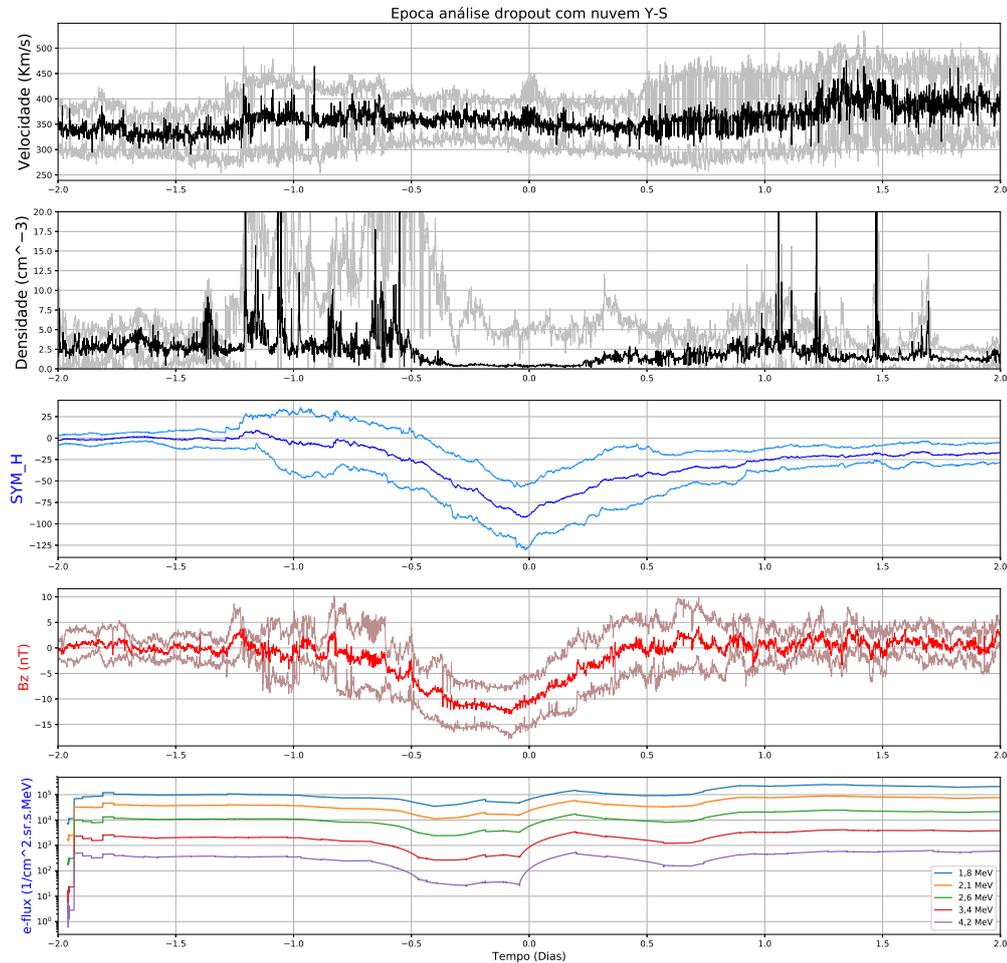
A análise de época superposta para a classe de nuvens S-N apresentada no gráfico da Figura 5.8, para nuvens com *dropout*, foi a que apresentou a melhor resposta comparando-se os parâmetros do meio interplanetário com o fluxo de elétrons do cinturão de radiação externo.

A velocidade do vento solar apresentou um aumento gradual de aproximadamente  $370\text{km/s}$  para  $500\text{km/s}$  no período de 24h antes do Tempo Zero, mantendo-se em torno de  $500\text{km/s}$  até o final do período. A densidade apresentou valores variados com muitos picos em todo período.

O índice SYM-H apresenta um vale bem definido, e é possível notar um sutil aumento na média desse índice coincidentemente com o aumento da velocidade, indicando presença do choque interplanetário. A queda do índice atinge aproximadamente  $-60nT$ , com posterior recuperação lenta. Esse valor médio do índice SYM-H pode explicar a maior queda no fluxo de elétrons do cinturão de radiação em comparação com os eventos das outras classificações. A média da componente  $B_z$  do campo magnético interplanetário apresenta clara rotação de sul para norte.

A análise de época da variação no fluxo de elétrons do cinturão externo acompanha muito bem a variação na componente  $B_z$  do meio interplanetário, atingindo o menor valor no Tempo Zero em todos os níveis de energia. A recuperação é gradual e acompanha muito bem o índice SYM-H.

Figura 5.9 - Análise de época superposta, para eventos com *dropout* classificados com Nuvem Y-S.



Gráficos da análise de época superposta para uma janela de 4 dias, com a amostra de todos os eventos classificados com ocorrência de dropout classificados como nuvens Y-S onde , aplicando as médias para a velocidade do vento solar  $Velocidade$  em  $Km/s$ , densidade de partículas  $Densidade$  em  $cm^{-3}$ , índice Simétrico  $SYM_H$ , a componente  $z$  do campo magnético interplanetário  $B_z$  em  $nT$ , com seus respectivos desvios padrões em cor mais clara que a média. Por último, é inferida a média para e-flux referente à variação do fluxo de partículas, dado em  $1/cm^2.sr.s.MeV$ , para os respectivos cinco níveis de energia,  $1,8MeV$  em azul,  $2,1MeV$  em amarelo,  $2,6MeV$  em verde,  $3,4MeV$  em vermelho e  $4,2MeV$  em lilás.

Fonte: Produção do autor.

Pode-se notar na Figura 5.9 que a média das velocidades do vento solar oscilaram entorno de  $350\text{km/s}$ , com um aumento em mais de um dia antes do Tempo Zero, coincidindo com aumento súbito na densidade, caracterizando o choque interplanetário, cuja resposta na magnetosfera é vista no índice SYM-H (cujo valor mínimo atingiu aproximadamente  $-90nT$  no tempo zero), com um súbito aumento nesse mesmo instante de tempo. A densidade fica baixa por um período de aproximadamente  $24h$ , centrado no Tempo Zero, coincidindo com a rotação no índice  $B_z$ , cujo valor mínimo foi aproximadamente  $-15nT$ , o que caracteriza a Nuvem Magnética.

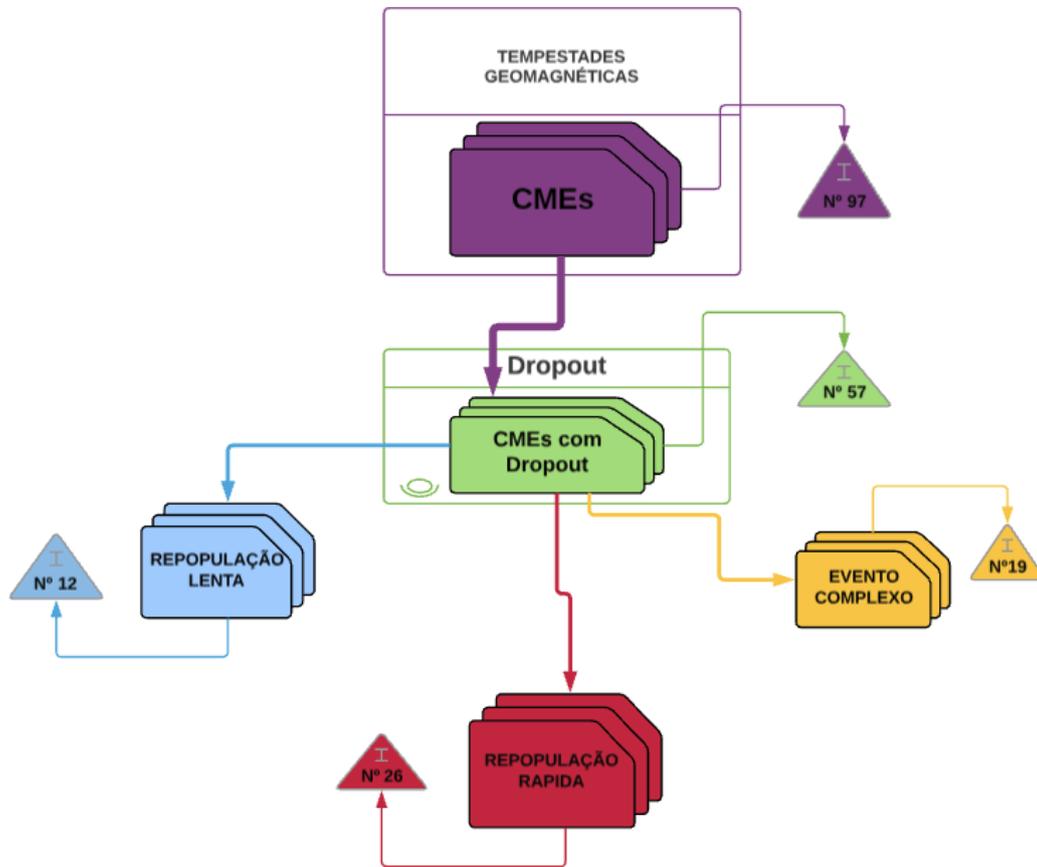
A análise de época superposta do fluxo de elétrons do cinturão de radiação externo acompanha a variação na componente  $B_z$  do meio interplanetário. As variações na população de elétrons atingem o menor valor perto do Tempo Zero, cuja queda ocorre no fluxo de todos os níveis de energia e a recuperação gradual é bem desenhada. Nota-se que, em média a região do cinturão externo possui aumento da população, sugerindo que nuvens com essas características em média sejam responsáveis pelo povoamento de partículas no cinturão.

### 5.3 Recuperação *dropout*

Usando a categorização quanto a tipo de recuperação, após os eventos de *dropout*, lembrando que a fase de recuperação não é escopo desse trabalho, foram classificados 26 eventos como sendo de recuperação rápida, 12 eventos como recuperação lenta, 19 eventos como complexos, sendo esses listados nas Tabelas 5.4, 5.5 e 5.6, respectivamente.

Um panorama da organização lógica dessa classificação é apresentado na Figura 5.10, quantificando o número de eventos em cada uma, a partir dos eventos do tipo com *dropout*.

Figura 5.10 - Diagrama esquemático da classificação das ICMEs com *dropout*, de acordo com o tipo de recuperação.



Organização e categorização das ICMEs com *dropout*, levando-se em consideração a recuperação do fluxo de elétrons do cinturão de radiação externo.

Fonte: Produção do autor.

O gráfico em forma de pizza, apresentado na Figura 5.11, quantifica os eventos dos períodos classificados como Recuperação Rápida - RR, Recuperação Lenta - RL e Eventos Complexos - EC, para todos eventos de ICMEs com *dropout*, Tabelas 5.4, 5.5 e 5.6.

Figura 5.11 - Gráfico referente ao tipo de recuperação no cinturão e ocorrência de *dropout*.

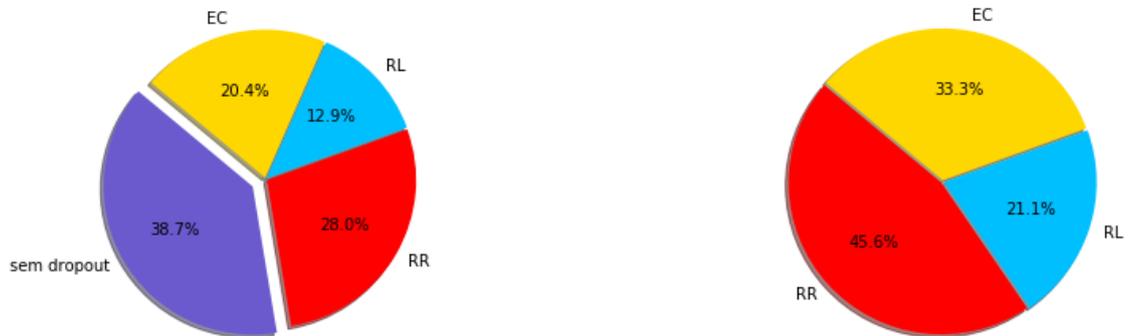


Gráfico que quantifica o número de eventos dos períodos classificados como Recuperação Rápida - RR, Recuperação Lenta - RL e Eventos Complexos - EC, para todos eventos de ICMEs com *dropout*, gráfico à esquerda e o mesmo removendo os eventos sem *dropout*.

Fonte: Produção do autor.

As colunas das Tabelas 5.4, 5.5 e 5.6 abaixo, são: **Dst data** - data e hora (AAAA/MM/DD/HH) do valor apontado na terceira coluna **Dst** (nT), dada em UT (*Universal Time* a coluna **Dst** , (nT) que apresenta os menores valores atingindo pelo índice Dst, dado em  $nT$ ; a segunda coluna, **Nuvem Tipo**, refere-se ao tipo de nuvem usado para classificar os eventos, utilizando os critérios definidos na metodologia. Foram classificados três tipos de nuvens magnéticas de acordo com a polaridade da componente  $B_z$  do campo magnético interplanetário: N-S, S-N e Y-S, o valor 'I' indica a não ocorrência de nuvem.

Tabela 5.4 - Tabela Eventos com *dropout* e Recuperação Rápida - RR

<b>Dst data</b>	<b>Nuvem Tipo</b>	<b>Dst (nT)</b>	<i>dropout</i>	Dropout Tipo
2012/10/09/09	Y-S	-107	Y	RR
2013/01/17/24	S-N	-52	Y	RR
2013/03/17/21	N-S	-132	Y	RR
2013/04/30/09	S-N	-47	Y	RR
2013/05/01/19	N-S	-72	Y	RR
2013/06/07/02	S-N	-78	Y	RR
2013/06/29/07	N-S	-102	Y	RR
2013/06/06/01	N-S	-87	Y	RR
2013/10/02/08	S-N	-72	Y	RR
2013/10/09/02	I	-69	Y	RR
2013/11/09/08	S-N	-80	Y	RR
2013/11/11/07	I	-30	Y	RR
2014/02/09/02	S-N	-39	Y	RR
2014/02/19/03	S-N	-119	Y	RR
2014/04/12/09	Y-S	-86	Y	RR
2014/04/30/10	Y-S	-67	Y	RR
2014/06/08/23	I	-37	Y	RR
2015/01/07/11	S-N	-99	Y	RR
2015/03/17/23	S-N	-223	Y	RR
2015/06/23/05	S-N	-204	Y	RR
2015/08/16/08	S-N	-84	Y	RR
2015/09/21/21	I	-75	Y	RR
2015/12/20/23	Y-S	-155	Y	RR
2016/01/01/01	S-N	-117	Y	RR
2016/01/20/19	S-N	-93	Y	RR
2016/10/13/18	Y-S	-104	Y	RR

Tabela 5.5 - Tabela dos eventos com *dropout* e Recuperação Lenta - RL

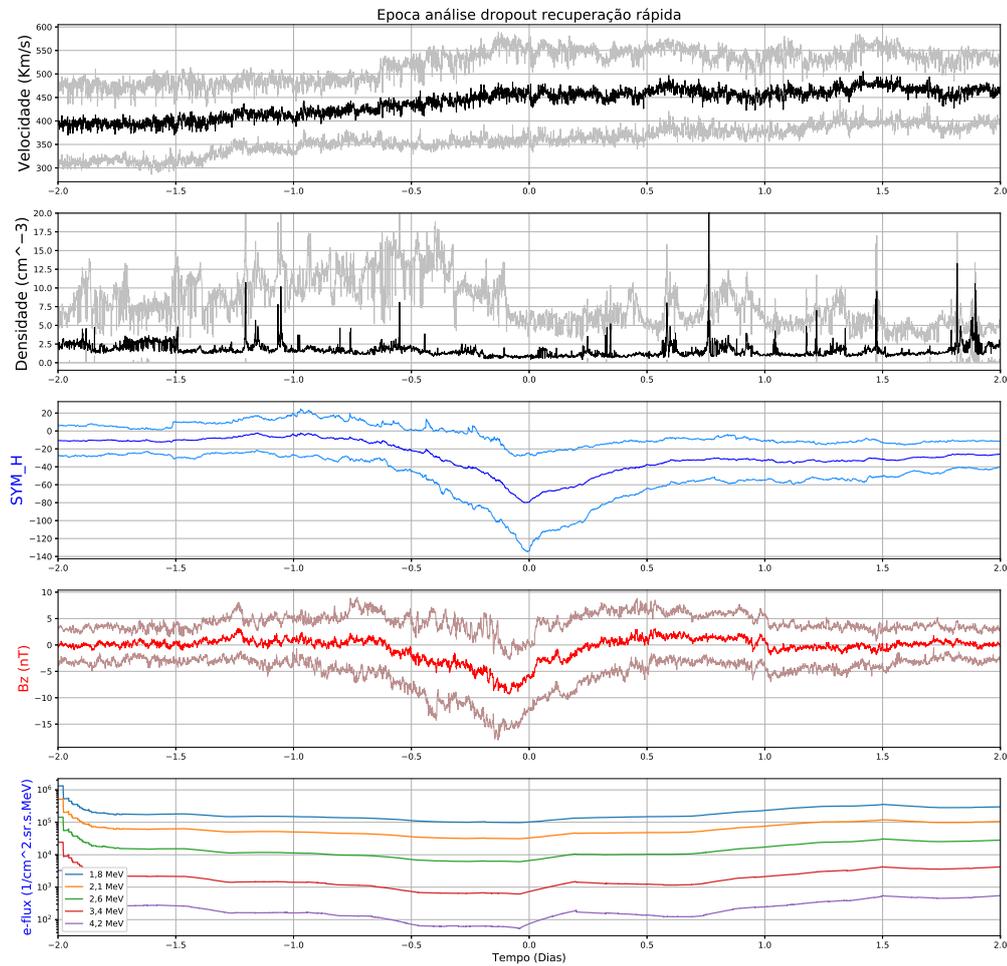
<b>Dst data</b>	<b>Nuvem Tipo</b>	<b>Dst (nT)</b>	<i>dropout</i>	Dropout Tipo
2012/11/01/21	Y-S	-65	Y	RL
2012/11/14/08	N-S	-108	Y	RL
2013/07/14/23	N-S	-81	Y	RL
2014/02/16/12	S-N	-24	Y	RL
2014/08/19/22	S-N	-28	Y	RL
2014/09/12/23	N-S	-88	Y	RL
2014/12/22/06	S-N	-71	Y	RL
2015/05/06/19	S-N	-28	Y	RL
2015/05/10/15	N-S	-51	Y	RL
2015/05/18/05	S-N	-44	Y	RL
2015/09/08/10	N-S	-94	Y	RL
2016/07/20/07	S-N	-23	Y	RL

Tabela 5.6 - Tabela de eventos com *dropout*, complexos - EC

<b>Dst data</b>	<b>Nuvem Tipo</b>	<b>Dst (nT)</b>	<i>dropout</i>	Dropout Tipo
2013/05/25/07	I	-47	Y	EC
2013/08/21/06	I	-26	Y	EC
2013/12/25/14	Y-S	-35	Y	EC
2014/02/18/09	I	-67	Y	EC
2015/01/02/22	I	-42	Y	EC
2015/01/04/16	N-S	-62	Y	EC
2015/03/22/15	I	-43	Y	EC
2015/03/28/09	N-S	-29	Y	EC
2015/06/25/15	I	-86	Y	EC
2015/06/26/06	I	-57	Y	EC
2015/08/27/21	I	-92	Y	EC
2015/11/04/13	I	-60	Y	EC
2015/11/07/07	S-N	-89	Y	EC
2016/04/14/21	I	-59	Y	EC
2016/04/17/09	I	-25	Y	EC
2016/07/24/11	N-S	-34	Y	EC
2016/07/26/21	I	-10	Y	EC
2016/08/03/11	S-N	-14	Y	EC
2016/11/10/18	N-S	-59	Y	EC

As Figuras 5.12, 5.13 e 5.14 mostram a análise de época superposta, que seguiu a mesma metodologia para os eventos classificados de acordo com a polaridade da nuvem magnética.

Figura 5.12 - Análise de época superposta, para os eventos RR.

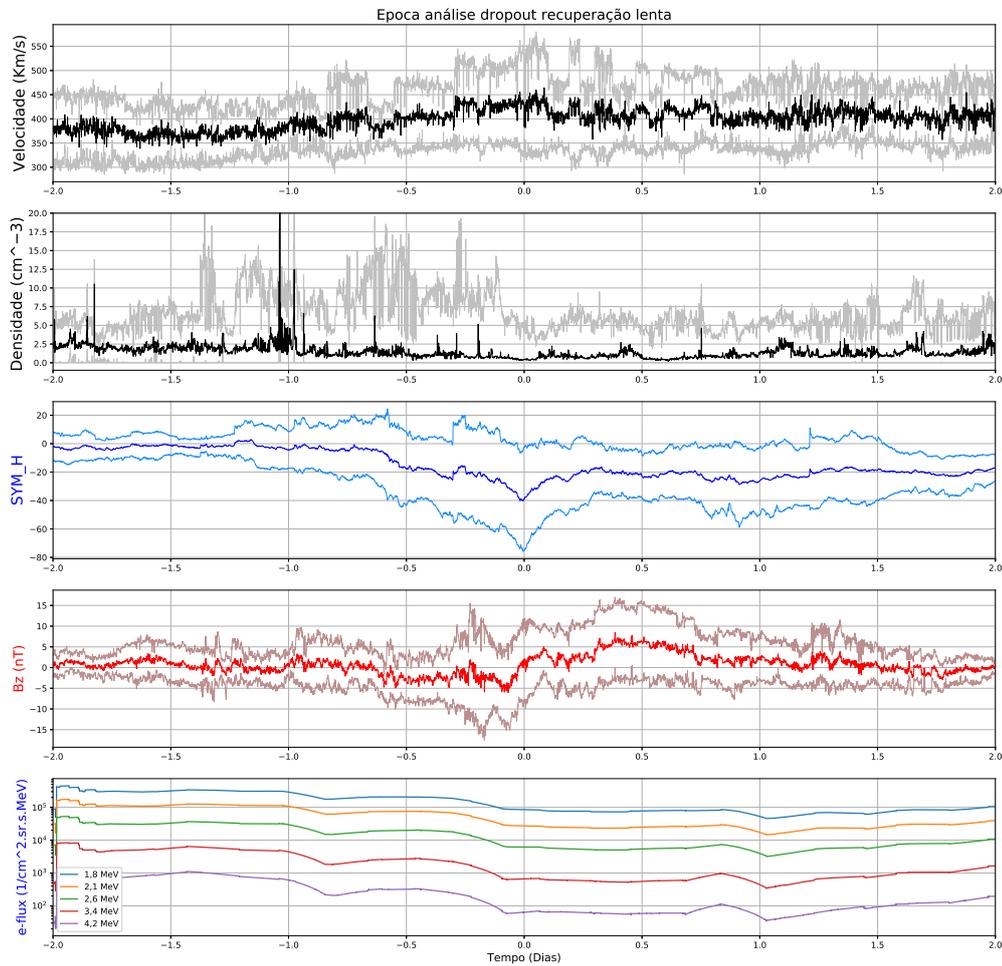


Gráficos da análise de época superposta para todos os eventos de Recuperação Rápida. Na ordem de cima para baixo tem-se a velocidade do vento solar  $Velocidade$  em Km/s, a densidade de partículas  $Densidade$  em  $cm^{-3}$ , o índice simétrico H  $SYM_H$  a componente  $z$  do campo magnético interplanetário  $B_z$  em nT, todas com seus respectivos desvios padrões em cor mais clara que a média. Por último, é inferido a média para e-flux referente à variação do fluxo de partículas, dado em  $1/cm^2.sr.s.MeV$ , para os respectivos cinco níveis de energia, 1,8MeV em azul, 2,1MeV em amarelo, 2,6MeV em verde, 3,4MeV em vermelho e 4,2 MeV em lilás.

Fonte: Produção do autor.

Análise de época para classe RR, mostrado na Figura 5.12, mostrou que as grandezas físicas que representam o vento solar apresentaram aumento gradativo para todo período, com pouca flutuação. A densidade de partículas do meio interplanetário é estável em todo período. O índice simétrico é bem definido com o Tempo Zero no seu vale, nota-se uma queda na componente z do campo magnético interplanetário, marcado por um vale no gráfico em vermelho de aproximadamente um dia, com o menor valor próximo do tempo zero, atingindo aproximadamente  $-10nT$ . O fluxo de elétrons no cinturão de radiação mostra um aumento no fluxo de elétrons logo após o tempo zero.

Figura 5.13 - Análise de época superposta, RL.



Gráficos da análise de época superposta para todos os eventos de Recuperação Lenta. Na ordem de cima para baixo tem-se a velocidade do vento solar  $Velocidade$  em Km/s, a densidade de partículas  $Densidade$  em  $cm^{-3}$ , o índice simétrico H  $SYM_H$  a componente  $z$  do campo magnético interplanetário  $B_z$  em nT todas com seus respectivos desvios padrões em cor mais clara que a média. Por último, é inferida a média para e-flux referente à variação do fluxo de partículas, dado em  $1/cm^2.sr.s.MeV$ , para os respectivos cinco níveis de energia, 1,8MeV em azul, 2,1MeV em amarelo, 2,6MeV em verde, 3,4MeV em vermelho e 4,2 MeV em lilás.

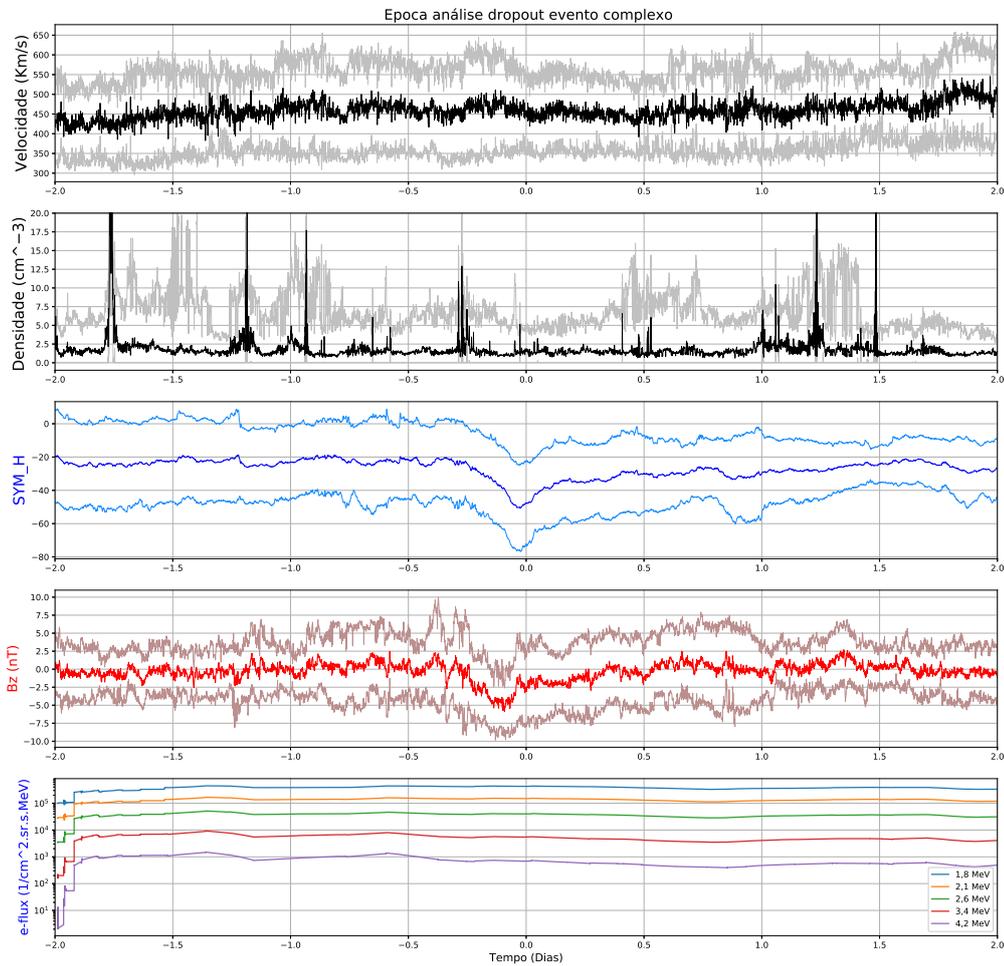
Fonte: Produção do autor.

Análise de época para classe RL, Figura 5.13, teve em média a velocidade do vento solar estável perto de  $400\text{km/s}$ , com um pico perto do tempo zero, mesmo instante em que a densidade média de partículas do meio interplanetário torna-se estável.

A característica marcante dessa classe é na componente z do campo magnético interplanetário, visível por um vale perto do Tempo Zero marcado logo em seguida por um aumento na intensidade, relacionada no tempo com o degrau visto no fluxo de elétrons no cinturão externo.

A intensificação da componente  $B_z$ , passando a ser positiva, sugere que o campo magnético terrestre intensifique suas linhas de campo, dificultando a entrada de partículas e a recuperação, explicando o comportamento da dinâmica das partículas desta classe específica, e as perdas gradativas após o Tempo Zero.

Figura 5.14 - Análise de época superposta, EC.



Gráficos da análise de época superposta para eventos Complexos. Na ordem de cima para baixo tem-se a velocidade do vento solar  $Velocidade$  em Km/s, a densidade de partículas  $Densidade$  em  $cm^{-3}$ , o índice simétrico H  $SYM_H$  a componente  $z$  do campo magnético interplanetário  $B_z$  em  $nT$  todas com seus respectivos desvios padrões em cor mais clara que a média. Por último, é inferida a média para e-flux referente à variação do fluxo de partículas, dado em  $1/cm^2.sr.s.MeV$ , para os respectivos cinco níveis de energia, 1,8MeV em azul, 2,1MeV em amarelo, 2,6MeV em verde, 3,4MeV em vermelho e 4,2 MeV em lilás.

Fonte: Produção do autor.

A análise de época para classe EC, Figura 5.14, apresenta valores constantes em média para densidade e velocidade do vento solar com poucas flutuações.

O índice simétrico apresentou pouca variação, porém no decorrer do tempo apresentou médias menores que  $-20\text{nT}$  e teve seu vale marcado no Tempo Zero.

A componente z do campo magnético interplanetário apresentou flutuações pequenas, oscilando entre valores positivos e negativos nas extremidades.

Já o comportamento apresentado há 12 horas do marco zero é majoritariamente negativo, essas flutuações não apresentaram quedas, o que corrobora com a constância visível no gráfico representativo do fluxo de elétrons do cinturão de radiação, uma vez esperadas respostas do cinturão a variações abruptas em  $B_z$ .

## 6 ESTUDOS DE CASO

Nesse capítulo foram escolhidos dois eventos, um com recuperação rápida (17 de março de 2013) do fluxo de elétrons do cinturão de radiação externo, e outro com recuperação lenta (12 de setembro de 2014) para uma análise mais detalhada, olhando também para a atividade de ondas ULF, cuja interação com os elétrons do cinturão pode influenciar na ocorrência ou não de *dropout*. Para isso foram feitos os gráficos mostrados pelas Figuras 6.1 e 6.4, onde o fluxo de elétrons do cinturão de radiação de  $2,1\text{MeV}$ , apresentado no primeiro painel das referidas Figuras, é representado por um mapa de cor, sendo maior fluxo na cor vermelho escuro e menor fluxo na cor azul escuro, em função do Lstar (eixo  $y$ ) que indica a altitude a partir de  $2R_e$  até  $6R_e$  compreendendo o cinturão externo e em função do tempo (eixo  $x$ ), cujos dados foram obtidos pela instrumento REPT da sonda Van Allen - A. O segundo painel apresenta o gráfico da Velocidade do Vento Solar em  $\text{km/s}$ , o terceiro painel apresenta o gráfico da densidade de partículas no meio interplanetário em  $\text{cm}^{-3}$ , e o quarto painel apresenta o gráfico da temperatura de prótons do vento solar em  $\times 10^5 K$ , todos medidos pelo satélite ACE, no ponto Lagrangeano L1. No quinto painel são apresentados gráficos das pressões cinética, em azul,  $P_k$  e magnética,  $P_B$ , em preto, que nos dá indicação de qual pressão está dominando em cada instante de tempo. O sexto painel apresenta o gráfico da posição da magnetopausa, dada em raios terrestres, calculada pelo modelo de Shue et al. (1998), mostrando o quanto a magnetopausa e conseqüentemente a magnetosfera terrestre pode ser comprimida pela ação da estrutura interplanetária que empurra o campo magnético da Terra. O sétimo painel apresenta o gráfico do campo magnético interplanetário total em  $nT$ . O oitavo painel apresenta o gráfico das componentes do campo magnético interplanetário  $B_x$  em preto e  $B_y$  em azul, dados em  $nT$ . O nono painel mostra o gráfico da componente  $B_z$  em vermelho, dados em  $nT$ , do IMF. Os dados do campo magnético interplanetário são obtidos pelo satélite ACE. O penúltimo painel apresenta o parâmetro  $\beta$ , que é a razão entre as pressões Cinética e Magnética. O último painel mostra o gráfico do índice simétrico, ( $SYM_H$ ), dado em  $nT$ , gerado pela média dos dados de magnetômetros de superfície na região equatorial do globo terrestre.

Adicionalmente foi feita uma análise das interações onda-partícula, a fim de relacionar a atividade de ondas do tipo ULF (*Ultra Low Frequency*), com a dinâmica de elétrons no cinturão externo, e para isso foram utilizados dados da rede CARISMA (*Canadian Array for Realtime Investigations of Magnetic Activity*), para quantificar graficamente as atividades de onda nos períodos estudados, explicados na metodologia. Os gráficos das Figuras 6.2 e 6.5 representam a atividade de onda

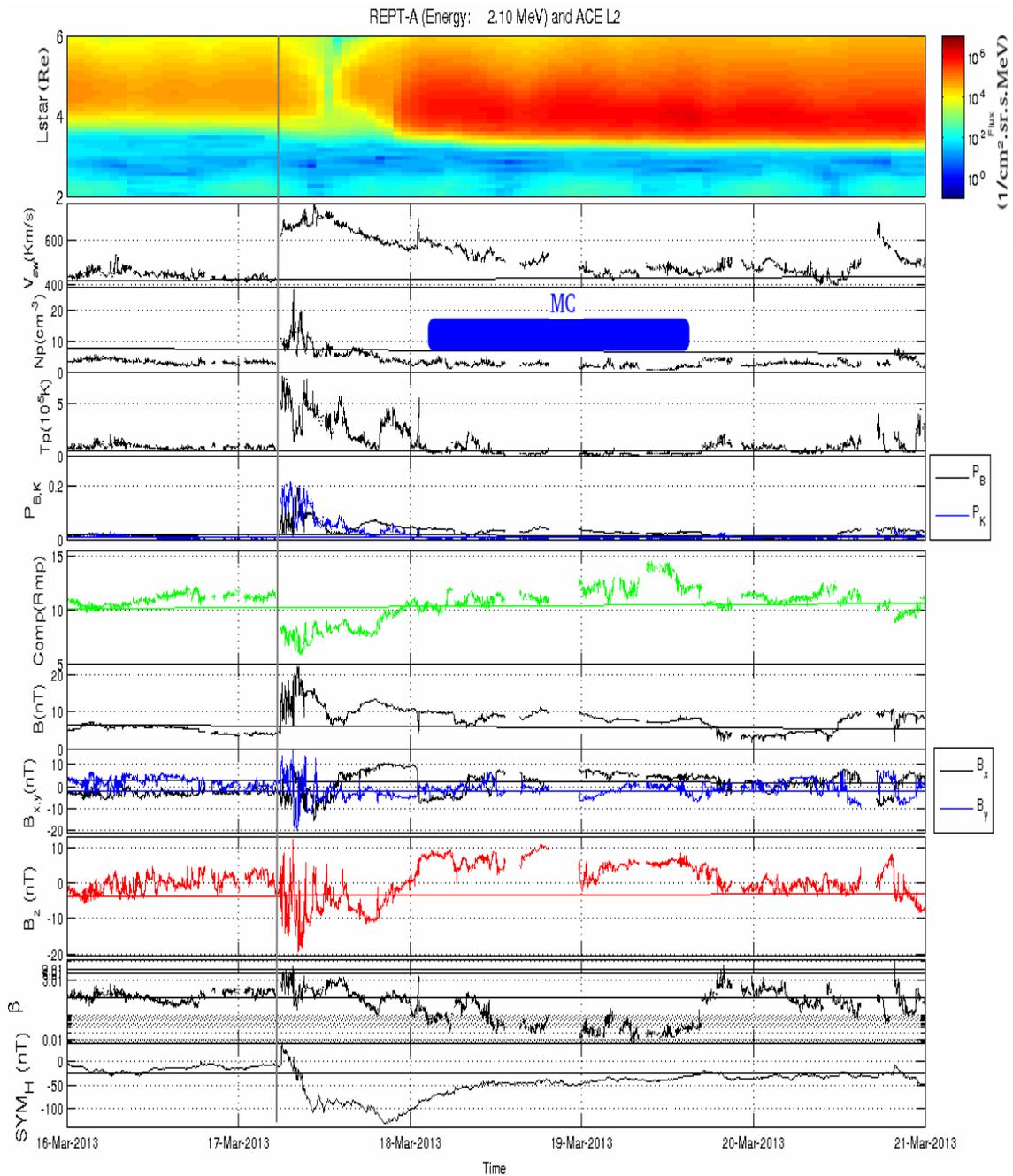
ULF- presentes em um período de 3 dias dentro do intervalo do distúrbio estudado, disposto em horas corridas, para os dois painéis, onde no primeiro painel mostra a variação da componente horizontal do campo magnético, dado em  $nT$ , medido por magnetômetro de solo e expresso por  $\Delta H$ . O segundo painel mostra a densidade de potência, através da escala de cores dada em  $nT^2/Hz$ , para determinada frequência em  $mHz$ .

As Figuras 6.3 e 6.6, expressam três visões da posição das sondas gêmeas Van Allen Probes, em coordenadas GSE, para os instantes de tempo próximos do momento da chegada do choque associado à estrutura. Saber onde as medidas foram feitas pelas Van Allen Probes é importante para interpretação dos dados de atividade de ondas.

### **6.1 Caso de Recuperação Rápida: evento do dia 17 de março de 2013**

O primeiro caso estudado é o evento ocorrido no dia 17 de março de 2013, de recuperação rápida, uma vez que a população do cinturão de radiação se reestabelece em menos de um dia após o *dropout*, conforme pode ser visto no primeiro painel da Figura 6.1:

Figura 6.1 - Fluxo de elétrons do Cinturão de Van Allen e parâmetros do meio interplanetário, do evento ocorrido no dia 17 de março de 2013.



Os painéis de cima para baixo apresentam: fluxo de elétrons na faixa de  $2,1\text{MeV}$ ; velocidade do vento solar  $V_{sw}$ , em  $\text{km/s}$ ; densidade de partículas no meio interplanetário  $N_p$  em  $\text{cm}^{-3}$ ; temperatura do vento solar  $T_p$  em  $10^5 K$ ; pressão cinética  $P_k$ , em azul e pressão magnética  $P_B$ , em preto; posição da magnetopausa  $Comp(Rmp)$ , em raios terrestres; campo magnético interplanetário total  $B$ , em  $nT$ ; componentes  $B_x$  em preto e  $B_y$  em azul, dadas em  $nT$ ; componente  $B_z$  do IMF, dada em  $nT$ ; o parâmetro  $\beta$ ; e o índice simétrico,  $SYM_H$ , dado em  $nT$

Fonte: Produção do autor.

A linha vertical cinza na Figura 6.1 indica o instante que o satélite ACE mediu uma descontinuidade nos parâmetros de plasma e campo magnético, caracterizando um choque interplanetário, aproximadamente às 09:00h do dia 17 de março de 2013. A pressão dinâmica do vento solar tem um aumento associado à chegada do choque, que empurrou a magnetopausa para  $\sim 5$  raios terrestres, indicando que um dos mecanismos que atuou para a perda de elétrons do cinturão é o *shadowing* da magnetopausa que chegou na altitude do cinturão de radiação. Essa estrutura possui nuvem magnética, representada no painel da densidade por uma barra horizontal em azul forte denominada MC.

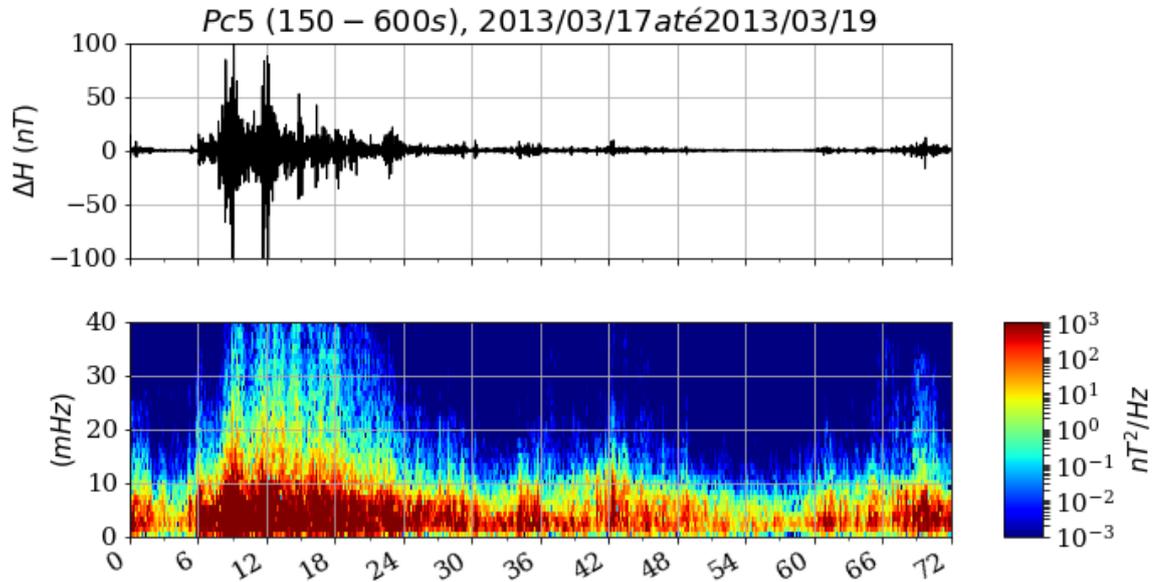
Outro fato interessante nesse evento é que a perda de elétrons do cinturão externo ocorreu em todas as altitudes do cinturão, iniciando próximo a  $6R_e$  coincidentemente com o choque, provavelmente devido ao *shadowing* da magnetopausa e estendendo-se até  $4R_e$ . Uma proposta deste trabalho é que um ingrediente que contribuiria na perda de elétrons do cinturão de radiação, que atuaria juntamente com o *shadowing* da magnetopausa, é o fato de geralmente o *dropout* estar temporalmente associado à componente  $B_z$  do IMF negativa, indicando que o mecanismo de reconexão magnética está ocorrendo, sugerindo que esse mecanismo facilite a perda de partículas do cinturão para o meio interplanetário uma vez que durante a passagem da MC (nuvem magnética), a componente  $B_z$  está positiva e nenhuma variação no fluxo de elétrons do cinturão é observado.

Li et al. (2014), que estudaram esse mesmo evento, mostraram que as ondas *choros*, ondas com frequências maiores que as ondas ULF, desempenham um papel dominante na aceleração dos elétrons no cinturão de radiação para energias altamente relativísticas durante esta tempestade geomagnética. Ainda ressaltaram que os processos de perda impulsionados pelas ondas EMIC, ondas com frequências menores que as ondas ULF, podem não ser significativos no cinturão externo de radiação neste caso particular.

Ao estudar a repopulação do cinturão para essa tempestade, Boyd et al. (2014) mostrou que elétrons de mais baixa energia presentes no *sheet* do plasma, com energias entre de 10 a 100 *keV*, são excitados até a ordem de *MeV*, aumentando a população de elétrons no cinturão de radiação, tendo como mecanismo principal o transporte radial.

A magnetosfera interna da Terra desempenha um papel crucial na aceleração de elétrons. O gráfico da Figura 6.2 apresenta de certa forma a oscilação do campo magnético terrestre em uma faixa de frequência Pc5.

Figura 6.2 - Representação da atividade de onda ULF, para tempestade do dia 17 de março de 2013.



Espectrogramas de dados filtrados da componente H no intervalo 150 – 600s (Pc5).

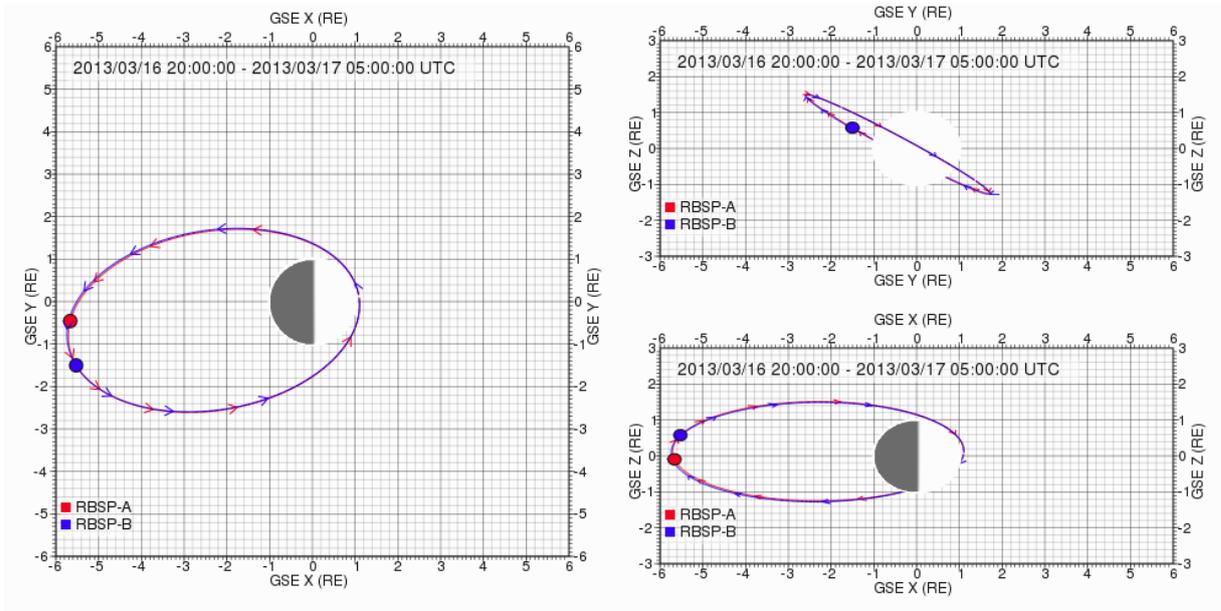
Fonte: Produção do autor.

O gráfico da Figura 6.2 mostra a presença de atividade de ondas ULF concomitantemente à chegada da estrutura interplanetária, com variações muito altas e por um intervalo de tempo considerável para interação e troca de energia, sugerindo troca de energia com partículas presentes nas linha de campo próximo de  $L \sim 4, 5$  raios terrestres, altura essa onde através do mapa de cor do primeiro painel da Figura 6.1 é esboçada uma perda considerável na população do cinturão para o mesmo instante de tempo, mostrando que as ondas ULF tiveram papel importante na perda de partículas da região.

A Figura 6.3 mostra a órbita das Val Allen Probes A, em vermelho, e B, em azul, para o período de tempo do evento estudado. Durante o período do evento, a Van Allen Probes estava orbitando preferencialmente o lado noturno do cinturão, na região onde as ondas *choros* aparecem com maior frequência, corroborando com os resultados de Li et al. (2014). Boyd et al. (2014) citou em seu trabalho que a identificação da aceleração das partículas, que culminou a sua conclusão de repovoamento

e transporte de partículas do plasma sheet, só foi possível por causa da posição relativa da órbita das sondas no momento do choque.

Figura 6.3 - Órbita das sondas Van Allen probes, para o dia 17 de janeiro de 2013 .



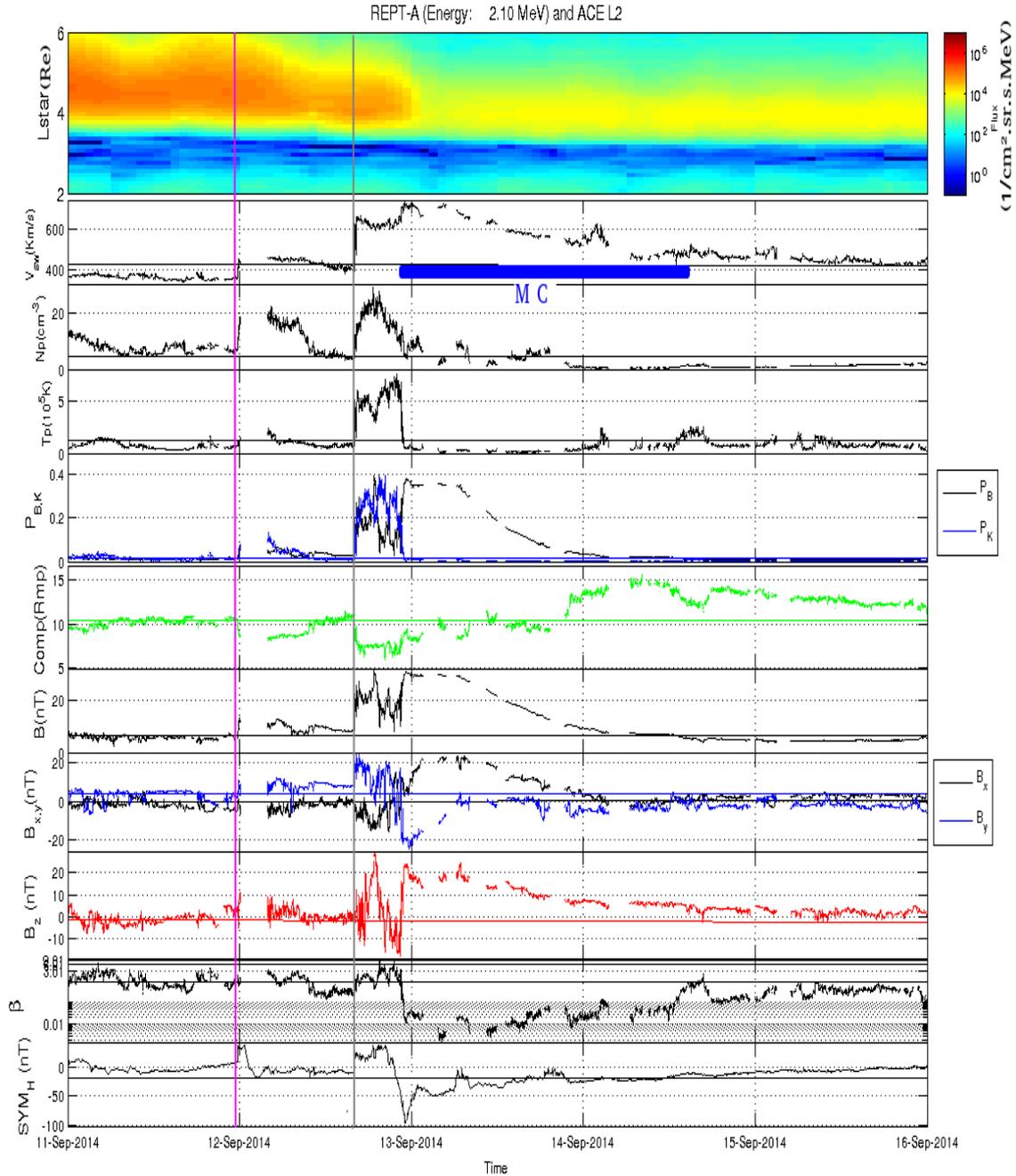
Órbitas das sondas Van Allen Probes para o dia 17 de janeiro de 2013: em vermelho, a sonda Van Allen A e, em azul, a Van Allen B, em coordenadas GSE, em três planos diferentes.

Fonte: Adaptado de [Gataway \(2019\)](#)

## 6.2 Caso de Recuperação Lenta: evento do dia 12 de setembro de 2014

O evento do dia 12 de setembro de 2014 apresenta dois choques intensos, o primeiro apontado pela linha rosa vertical, onde ocorre um salto nos parâmetros do vento solar, visível na Figura 6.4. O segundo choque, linha vertical cinza, mais intenso que o primeiro, está associado a uma nuvem magnética, barra azul identificada por MC, que acarretou em uma queda no fluxo de elétrons sem que fosse identificada recuperação durante o período de análise.

Figura 6.4 - Parâmetros do meio interplanetário e cinturão de radiação, para ICME do dia 12 de setembro de 2014.



Os painéis de cima para baixo apresentam: fluxo de elétrons na faixa de 2,1MeV; velocidade do vento solar  $V_{sw}$ , em  $\text{km/s}$ ; densidade de partículas no meio interplanetário  $N_p$  em  $\text{cm}^{-3}$ ; temperatura do vento solar  $T_p$  em  $10^5 \text{K}$ ; pressão cinética  $P_k$ , em azul e pressão magnética  $P_B$ , em preto; posição da magnetopausa  $Comp(\text{Rmp})$ , em raios terrestres; campo magnético interplanetário total  $B$ , em  $\text{nT}$ ; componentes  $B_x$  em preto e  $B_y$  em azul, dadas em  $\text{nT}$ ; componente  $B_z$  do IMF, dada em  $\text{nT}$ ; o parâmetro  $\beta$ ; e o índice simétrico,  $SYM_H$ , dado em  $\text{nT}$

Fonte: Produção do autor.

Nota-se que o *dropout* ocorreu em vários 'estágios' e em diferentes níveis de Lstar, cuja primeira perda ocorreu coincidentemente com o primeiro choque, linha rosa, e uma segunda queda algumas horas após o segundo choque, coincidindo com a inversão de  $B_z$  de positivo para negativo, e uma forte compressão da magnetopausa, que atingiu aproximadamente  $7 R_e$ . Logo após o primeiro choque, não há dados do IMF, portanto não tem como saber qual era a polaridade da componente  $B_z$  do IMF, mas podemos dizer que a magnetopausa atingiu aproximadamente  $8 R_e$ .

A nuvem magnética, representada pela barra horizontal em azul forte e denominada (MC), no painel referente à velocidade do vento solar é identificada pela rotação na componente  $B_y$  do campo magnético interplanetário, indicando que essa nuvem estava bastante inclinada com relação ao plano da eclíptica, e valores baixos do parâmetro  $\beta$ , além de apresentar uma queda na temperatura característica típica de nuvem (BURLAGA, 1988).

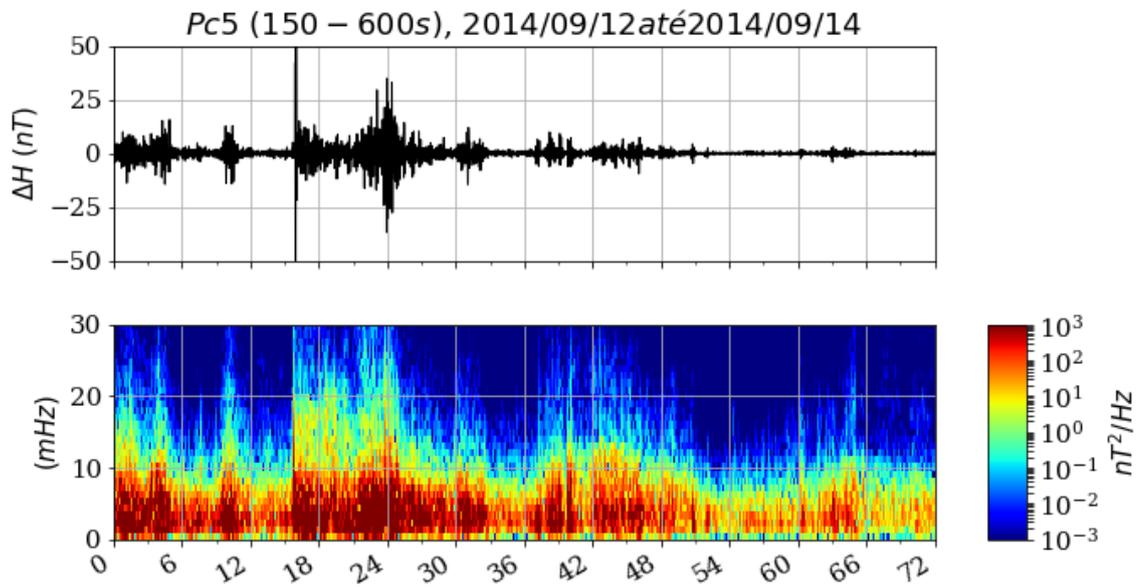
A nuvem magnética (MC) que seguiu o segundo choque teve um componente  $B_z$  positivo por três dias, assim sugerindo a inexistência de reconexão magnética, impedindo que novas partículas adentrassem o cinturão de radiação e povoassem a região.

Alves et al. (2016) investigaram esse evento, buscando as causas para perda de população de elétrons no cinturão de radiação externo, através de investigações sobre o *shadowing* da magnetopausa e interações onda-partícula, considerados os mecanismos para perdas de elétrons da faixa de radiação externa mais eficientes.

Para este período, Alves et al. (2016) constataram que a atividade de onda de chorus foi aumentada logo após a chegada do segundo choque interplanetário. E mostram que as interações por ondas chorus podem acarretar em aceleração de partículas, quando o tempo de interação excede pelo menos três períodos da onda, acelerando assim determinadas partículas mudando seu *pitch angle*. Sugerem também que a interação onda-partícula através de ondas de chorus e ULF juntas têm importante papel na perda de elétrons relativística observada neste evento de *dropout*.

A Figura 6.5, indica pulsações do tipo PC5 e presença de ondas ULF, nesse período, com intensidades de ondas moderadas, porém, por um tempo significativamente alto, e com vários picos concomitantes com as ondas de choque que perturbaram a magnetosfera, Figura 6.4. A presença de ondas não garante uma relação direta com a perda na população vista no primeiro painel da Figura 6.4.

Figura 6.5 - Representação atividade de onda ULF, para tempestade do dia 12 de setembro de 2014.

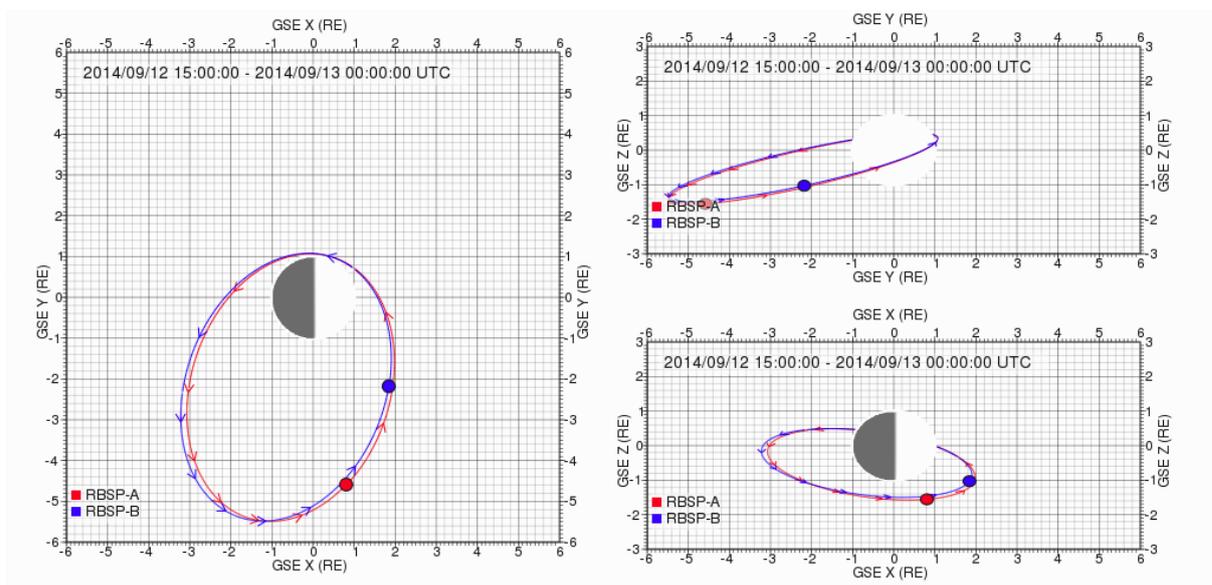


Espectrogramas de dados filtrados da componente H no intervalo 150 – 600s (Pc5).

Fonte: Produção do autor.

A órbita das Van Allen Probes, para o período estudado, é apresentada na Figura 6.6, que mostra que as sondas orbitavam a região onde a presença de *chorus* é mais frequente.

Figura 6.6 - Órbita das sondas Van Allen probes, para tempestade do dia 12 de setembro de 2014 .



Representação das órbitas das sondas Van Allen Probes para tempestade do dia 12 de setembro de 2014: em vermelho, a sonda Van Allen A, e em azul, a Van Allen B, em coordenadas GSE, em três cortes diferentes.

Fonte: Adaptado de Gataway (2019)

## 7 CONCLUSÃO

Nesse trabalho foram estudados todos os eventos de *dropout* causados por ICMEs registrados pelas Sondas Van Allen Probes entre 2012 e 2017, que foram classificados de acordo com diferentes aspectos como:

- Polaridade da nuvem magnética, onde 13 eventos foram classificados como N-S; 21 eventos foram classificados como S-N; 7 eventos foram classificados como Y-S e 16 eventos não apresentaram características de nuvem magnética;
- Tipo de recuperação de fluxo de elétrons do cinturão de radiação, onde 26 eventos foram de Recuperação Rápida, 12 eventos foram de Recuperação Lenta e 19 eventos foram classificados como complexos.

Para todas essas classificações foi feita uma análise de época superposta, que só foi possível após a realização de interpolação nos dados do fluxo de elétrons para um corte no Lstar  $5 R_e$ , uma vez que em cada órbita das sondas Van Allen Probes há distintos números de pontos, e a referida análise exige que todos os eventos possuam o mesmo número de pontos para a realização do cálculo da média, ponto a ponto.

A análise de época superposta tinha objetivo de identificar a relação do fluxo de elétrons do cinturão de radiação com os parâmetros do meio interplanetário, devido às características gerais dos eventos. Com isso os eventos classificados como *dropout* causados por nuvens do tipo S-N e Y-S foram os que apresentaram maior relação entre o fluxo de elétrons e a variação da componente  $B_z$  negativa. Nos eventos classificados como nuvem tipo N-S, a relação do  $B_z$  sul e do fluxo de elétrons foi menos intensa que a classificação S-N e Y-S, e os eventos com *dropout* sem nuvem não mostram nenhum decréscimo na análise de época superposta.

As análises de época superposta que mostraram maiores decréscimos no fluxo de elétrons do cinturão de Van Allen (S-N e Y-S) são os que também apresentam os menores valores da componente  $B_z$  e com maior tempo de permanência com valores negativos, indicando que, de forma geral, esses eventos mantiveram o mecanismo de reconexão magnética entre os campos Interplanetário e Geomagnético ativo por mais tempo, permitindo que os elétrons do cinturão escapassem do Cinturão para o Meio Interplanetário.

Na análise de época superposta dos eventos classificados como *dropout* com Recupe-

ração Rápida e com Recuperação Lenta, não houve evidências marcantes na relação da componente  $B_z$  do campo magnético interplanetário com *dropout* no fluxo de elétrons do cinturão de radiação. Esse tipo de análise não mostrou o padrão de recuperação no fluxo de elétrons, mostrando que ele não é eficaz no estudo da repopulação de elétrons, ou a classificação adotada não foi a mais adequada para esse tipo de evento. A conclusão mais clara desse tipo de classificação é que os eventos de recuperação lenta apresentaram relação com nuvens magnéticas em todos os casos, e para explicar por que isso dá, há necessidade de mais estudos de caso.

Com isso, a classificação adotada quanto à polaridade da componente  $B_z$  e  $B_y$  foi mais adequada para analisar a relação da reconexão magnética entre os campos Interplanetário e Geomagnético com o fluxo de elétrons do cinturão de Van Allen.

A ocorrência de *dropout* está ligada com a intensidade do distúrbio no campo geomagnético, notável pelo histograma da Figura 5.2, visto que tempestades mais intensas são causadas por ICMEs mais intensas, que por sua vez tendem a transportar mais energia, intensificando os mecanismos que fazem com que as partículas do cinturão sofram maiores variações.

Eventos classificados com *dropout*, encaixam-se na classificação de algum tipo de nuvem para mais de 72% dos casos. Os eventos em que ocorreram *dropout* e não apresentaram características de nuvem, sua maioria se enquadraram como eventos complexos em cerca de 82%. Isto é, apenas 5% dos eventos que acarretaram perda de partículas em aproximadamente uma ordem de grandeza não tem características de nuvem ou algum tipo de singularidade com perturbações ou outro tipo de estruturas causadora do distúrbio fato que sugere uma perturbação inicial na magnetosfera por fatores do meio interplanetário, o que, por sua vez, indica que o tipo de estrutura interplanetária desempenha um papel essencial na dinâmica das partículas do cinturão de radiação.

Nos estudos de caso, em ambos eventos, notou-se que quando ocorreu compressão da magnetopausa, devido à ICME, associada a valores negativos na componente  $B_z$  do campo magnético interplanetário, houve perda de população de elétrons do cinturão de radiação externo. Notou-se também um padrão no cinturão para passagem de nuvens com componente  $B_z$  positiva predominantemente, associado a valores altos da posição da magnetopausa, ou seja, sem mecanismo de shadowing da magnetopausa, onde a região do cinturão de radiação apresentou o comportamento de estagnação no fluxo de partículas. Nessas condições, a magnetosfera permanece “fechada” para a entrada e/ou saída de partículas. Há necessidade de fazer um estudo mais apro-

fundado para saber se somente a compressão da magnetosfera é capaz de causar um *dropout* ou há necessidade de a componente  $B_z$  do IMF estar negativa, ativando a reconexão magnética para que o *dropout* ocorra.

Para os estudos de caso, Recuperação Rápida - RR e Recuperação Lenta - RL, ambos apresentaram forte presença de ondas ULF. A relação entre os dois grupos estudados é inconclusiva, outros tipos de ondas e os mecanismos de interação onda-partícula precisam ser aprofundados para caracterizar a dinâmica de povoamento de elétrons energéticos do cinturão de radiação de Van Allen.



## 8 TRABALHOS FUTUROS

Há necessidade de estudar mais profundamente casos específicos para poder definir claramente a importância relativa de cada um dos mecanismos que fazem com que os elétrons do cinturão de radiação sejam perdidos;

Precisa-se estudar os *dropouts* causados por estruturas recorrentes do vento solar, tais como Regiões de Interação Corrotantes - CIR *Corotating Interaction Regions*;

A repopulação tem sido estudada e os mecanismos que levam à repopulação do cinturão de Van Allen em uma determinada energia mostram-se não lineares, portanto um estudo levando-se em conta mecanismos atuando de forma conjunta deve ser feito;

Estudos de caso indicam que cada tipo de estrutura solar que interage com o campo Geomagnético causa efeitos diferentes na dinâmica das partículas aprisionadas nos Cinturões de Radiação, e geram processos internos e externos ao campo magnético que facilitam ou dificultam a perda de elétrons (ALVES et al., 2016).

O fenômeno de reconexão entre os campos magnéticos interplanetário e terrestre é considerado a porta de entrada de partículas do vento solar para a magnetosfera terrestre, mas ao mesmo tempo, partículas aprisionadas nos Cinturões de Van Allen podem escapar para o vento solar.

A interação e troca de energia do meio interplanetário com a magnetosfera mostrou-se condizente com observações no cinturão de radiação. Os mecanismos envolvidos nesse processo de perda de elétrons devido à reconexão magnética ainda não estão bem estabelecidos e há indícios de que o fenômeno de reconexão entre os campos magnéticos interplanetário e terrestre juntamente com geometrias diferenciadas de estruturas interplanetárias são a porta de entrada de partículas do vento solar, assim estudar diferentes estruturas interplanetárias, interagindo com a magnetosfera, tem um valor científico alto. A categorização quanto ao tipo de estrutura mostrou padrões relevantes para área, o que sugere uma melhoria, visto que trata-se do primeiro trabalho relacionando classes de categorias por divisão quanto ao meio interplanetário e divisões de classes do cinturão de radiação.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, J. A. V.; FRANK, L. A. Radiation around the earth to a radial distance of 107,400 km. **Nature**, v. 183, 1959. 1, 10, 11

ALVES, L.; SILVA, L. D.; SOUZA, V.; SIBECK, D.; JAUER, P.; VIEIRA, L.; WALSH, B.; SILVEIRA, M.; MARCHEZI, J.; ROCKENBACH, M. Outer radiation belt dropout dynamics following the arrival of two interplanetary coronal mass ejections. **Geophysical Research Letters**, v. 43, n. 3, p. 978–987, 2016. 14, 98, 105

ALVES, L. A. d. S. **Reunião**. São José dos Campos, 2018. In: REUNIÃO GRUPO RADIATION BELT, 11-25 set. 2018, São José dos Campos. 42

BAKER, D.; KANEKAL, S.; HOXIE, V.; BATISTE, S.; BOLTON, M.; LI, X.; ELKINGTON, S.; MONK, S.; REUKAUF, R.; STEG, S. 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, 2006. 29, 30

BAKER, D. N. Satellite anomalies due to space storms. In: **DAGLIS, I. A. (Ed.) Space storms and space weather hazards**. [S.l.]: Springer, 2001. p. 285–311. 1

BAUMJOHANN, W.; TREUMANN, R. **Basic space plasma physics, Imperial coll.** [S.l.: s.n.], 1996. 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17

BAUMJOHANN, W.; TREUMANN, R. A. **Basic space plasma physics**. [S.l.]: World Scientific Publishing Company, 2012. 11

BORTNIK, J.; THORNE, R. The dual role of ELF/VLF chorus waves in the acceleration and precipitation of radiation belt electrons. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 69, n. 3, p. 378–386, 2007. 14, 17

BOTELER, D.; PIRJOLA, R.; NEVANLINNA, H. The effects of geomagnetic disturbances on electrical systems at the earth's surface. **Advances in Space Research**, v. 22, n. 1, p. 17–27, 1998. 27

BOTHMER, V.; DAGLIS, I. A. **Space weather: physics and effects**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2007. 2

BOYD, A. J.; SPENCE, H. E.; CLAUDEPIERRE, S.; FENNELL, J. F.; BLAKE, J.; BAKER, D.; REEVES, G.; TURNER, D. Quantifying the radiation belt seed population in the 17 march 2013 electron acceleration event. **Geophysical Research Letters**, v. 41, n. 7, p. 2275–2281, 2014. 94, 95

BROWN, R. Electron precipitation in the auroral zone. **Space Science Reviews**, v. 5, n. 3, p. 311–387, 1966. 3

BURLAGA, L. Magnetic clouds and force-free fields with constant alpha. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 93, n. A7, p. 7217–7224, 1988. 22, 98

BURLAGA, L.; LEPPING, R.; JONES, J. Global configuration of a magnetic cloud. **Physics of Magnetic Flux Ropes**, v. 58, p. 373–377, 1990. 22

CAMERA, E. P. I. NOAA Satellite and Information Service Deep Space Climate Observatory (DSCOVR) ENHANCED POLYCHROMATIC IMAGING CAMERA (EPIC) Background. In: . [s.n.], 2015. Disponível em: <[https://www.nesdis.noaa.gov/sites/default/files/asset/document/dscovr\\_epic\\_instrument\\_info\\_sheet.pdf](https://www.nesdis.noaa.gov/sites/default/files/asset/document/dscovr_epic_instrument_info_sheet.pdf)>. Acesso em: 07 jan. 2019. 29

CANE, H.; RICHARDSON, I. Interplanetary coronal mass ejections in the near-Earth solar wind during 1996–2002. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 108, n. A4, 2003. 30

CARISMA, R. Carisma station locations. 2019. Disponível em: <<http://www.carisma.ca/station-information>>. Acesso em: 16 jan. 2019. 51

COSTA JÚNIOR, E.; JR, F. J. R. S.; CARDOSO, F.; ALVES, M. Solar wind and geomagnetic activity. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 33, n. 4, p. 4301–4301, 2011. 3

DAL LAGO, A. **Estudo de nuvens magnéticas geofetivas no meio interplanetário**. Dissertao (Mestrado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1999. 22, 23, 24

DAL LAGO, A.; GONZALEZ, W. D.; GONZALEZ, A. L. C.; VIEIRA, L. E. A. Interação de nuvens magnéticas com o meio interplanetário circunvizinho. In: **INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY**, 6. [S.l.: s.n.], 1999. 75

DUNGEY, J. W. Interones. **Physical Review Letters**, v. 6, n. 2, p. 47, 1961. 27

- ECHER, E. Planetary magnetospheres. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 32, n. 2, p. 1–7, 2010. 2, 3, 37
- ELKINGTON, S. R. A review of ULF interactions with radiation belt electrons. **Geophysical Monograph-American Geophysical Union**, American Geophysical Union, v. 169, p. 177, 2006. 14, 17
- GARY, G. A. Plasma beta above a solar active region: rethinking the paradigm. **Solar Physics**, v. 203, n. 1, p. 71–86, 2001. 18
- GATAWAY, S. **Orbita rPlot Van Allen Probes**. 2019. Disponível em: <<http://rbspgrwv.jhuapl.edu/rPlotTime?orb>>. Acesso em: 2 jan. 2019. 96, 100
- GOLD, T. Magnetic storms. **Space Science Reviews**, v. 1, n. 1, p. 100–114, 1962. 22
- GOMBOSI, T. I. **Physics of the space environment**. [S.l.]: Cambridge University Press, 1998. 12, 13, 14
- GONZALEZ, W.; GONZALEZ, A. C.; TSURUTANI, B. Dual-peak solar cycle distribution of intense geomagnetic storms. **Planetary and Space Science**, v. 38, n. 2, p. 181–187, 1990. 37
- GONZALEZ, W.; JOSELYN, J.; KAMIDE, Y.; KROEHL, H.; ROSTOKER, G.; TSURUTANI, B.; VASYLIUNAS, V. What is a geomagnetic storm? **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 99, n. A4, p. 5771–5792, 1994. 2, 22, 69
- GOSLING, J.; PIZZO, V.; BAME, S. J. Anomalously low proton temperatures in the solar wind following interplanetary shock waves: evidence for magnetic bottles. **Journal of Geophysical Research**, v. 78, n. 13, p. 2001–2009, 1973. 22
- GURNETT, D.; BHATTACHARJEE, A. **Introduction to plasma physics: with space, laboratory and astrophysical applications**. Cambridge University Press, 2017. ISBN 9781107027374. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=HR8EDgAAQBAJ>>. Acesso em: 1 jan. 2019. 12
- HAPGOOD, M. Space physics coordinate transformations: a user guide. **Planetary and Space Science**, v. 40, n. 5, p. 711–717, 1992. 9

HARGREAVES, J. K. **The solar-terrestrial environment: an introduction to geospace-the science of the terrestrial upper atmosphere, ionosphere, and magnetosphere.** [S.l.]: Cambridge University Press, 1992. 1, 11

JOHN, R. R.; FREDERICK, J. M.; ROBERT, W. C. **Fundamentos da teoria eletromagnética.** Rio de Janeiro: Campus, 1982, 1982. 11

KAMIDE, Y.; BAUMJOHANN, W.; DAGLIS, I.; GONZALEZ, W.; GRANDE, M.; JOSELYN, J.; MCPHERRON, R.; PHILLIPS, J.; REEVES, E.; ROSTOKER, G. Current understanding of magnetic storms: storm-substorm relationships. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 103, n. A8, p. 17705–17728, 1998. 2

KIRCHHOFF, V. W. **Introdução à geofísica espacial.** [S.l.]: Nova Stella/EDUSP/FAPESP, 1991. 27

KIVELSON, M. G.; RUSSELL, C. T. **Introduction to space physics.** [S.l.]: Cambridge university press, 1995. 3, 27

KLEIN, L. W. B. L. F. Interplanetary magnetic clouds at 1 AU. **Journal of Geophysics**, v. 87, n. 12, p. 613–624, 1982. 22

KNECHT, D. J.; SHUMAN, B. **The geomagnetic field.** [S.l.]: Air Force Cambridge Research Laboratories, Space Physics Laboratory, 1972. 5, 6

KUBO, Y.; KATAOKA, R.; SATO, T. Interplanetary particle transport simulation for warning system for aviation exposure to solar energetic particles. **Earth, Planets and Space**, v. 67, n. 1, p. 117, 2015. 27

LI, W.; THORNE, R.; MA, Q.; NI, B.; BORTNIK, J.; BAKER, D.; SPENCE, H. E.; REEVES, G.; KANEKAL, S.; GREEN, J. Radiation belt electron acceleration by chorus waves during the 17 march 2013 storm. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 119, n. 6, p. 4681–4693, 2014. 94, 95

MANN, I.; MILLING, D.; RAE, I.; OZEKE, L.; KALE, A.; KALE, Z.; MURPHY, K.; PARENT, A.; USANOVA, M.; PAHUD, D. The upgraded CARISMA magnetometer array in the themis era. **Space Science Reviews**, v. 141, n. 1-4, p. 413–451, 2008. 30, 51

MCLEAN, S.; MACMILLAN, S.; MAUS, S.; LESUR, V.; THOMSON, A.; DATER, D. **The US/UK world magnetic model for 2005-2010.** [S.l.: s.n.], 2004. 4

MENDES, O. **A origem interplanetária e o desenvolvimento da fase principal das tempestades geomagnéticas moderadas (1978–1979)**. Tese (Doutorado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1992. 69

NUNES, J. **Precipitação de partículas carregadas na anomalia geomagnética brasileira, estudos de evidências**. Tese (Doutorado em Ciências) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Florianópolis, 1982. 13

OLIVEIRA, J. F. de; WAJNBERG, E.; ESQUIVEL, D. M. de S.; WEINKAUF, S.; WINKLHOFER, M.; HANZLIK, M. Ant antennae: are they sites for magnetoreception? **Journal of The Royal Society Interface**, p. v.7, p.143–152,, 2009. 27

PARKS, G. Book review: physics of space plasmas: an introduction/addison-wesley, 1991. **Nature**, v. 351, p. 281, 1991. 2, 18

PILCHOWSKI, J.; KOPP, A.; HERBST, K.; HEBER, B. On the definition and calculation of a generalised mcilwain parameter. **Astrophysics and Space Sciences Transactions**, v. 6, n. 1, p. 9–17, 2010. 5

PIZZELLA, G.; LAUGHLIN, C.; BRIEN, B. J. O. Note on the electron energy spectrum in the inner Van Allen belt. **Journal of Geophysical Research**, v. 67, n. 9, p. 3281–3287, 1962. 10

PNEUMAN, G. W.; KOPP, R. A. Coronal streamers. **Solar Physics**, v. 13, n. 1, p. 176–193, Jul 1970. ISSN 1573-093X. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/BF00963950>>. Acesso em: 16 jan. 2019. 2

RICHARDSON, I.; CANE, H. Near-earth interplanetary coronal mass ejections during solar cycle 23 (1996–2009): catalog and summary of properties. **Solar Physics**, v. 264, n. 1, p. 189–237, 2010. 30, 53, 63

ROCKENBACH, D. S. M. **Variação da intensidade dos raios cósmicos em resposta a diferentes estruturas magnéticas do meio interplanetário**. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2005. 2

ROEDERER, J. G.; LEJOSNE, S. Coordinates for representing radiation belt particle flux. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 123, n. 2, p. 1381–1387, 2018. 6, 7

- ROEDERER, J. G.; ZHANG, H. **Dynamics of magnetically trapped particles**. [S.l.]: Springer, 2016. 2, 4, 5, 15, 16
- SHUE, J.-H.; CHAO, J.; FU, H.; RUSSELL, C.; SONG, P.; KHURANA, K.; SINGER, H. A new functional form to study the solar wind control of the magnetopause size and shape. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 102, n. A5, p. 9497–9511, 1997. 18, 19
- SHUE, J.-H.; SONG, P.; RUSSELL, C.; STEINBERG, J.; CHAO, J.; ZASTENKER, G.; VAISBERG, O.; KOKUBUN, S.; SINGER, H.; DETMAN, T. Magnetopause location under extreme solar wind conditions. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 103, n. A8, p. 17691–17700, 1998. 18, 19, 91
- SINGH, Y. et al. Statistical considerations in superposed epoch analysis and its applications in space research. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 68, n. 7, p. 803–813, 2006. 53
- SOUZA, V.; SILVEIRA, M.; KOGA, D.; JAUER, P. Theoretical foundations of magnetic reconnection. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 38, n. 2, 2016. 27
- SPJELDVIK, W.; ROTHWELL, P. The radiation belts. In: JURSA, A. S. (Ed.). **Handbook of Geophysics and the Space Environment**. Washington: Washington, DC: Air Force Systems Command, DC, 1985. p. 1–5. 10, 12
- STERN, D. P.; NESS, N. Planetary magnetospheres. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, v. 20, n. 1, p. 139–161, 1982. 2
- STONE, E. C.; FRANDBSEN, A.; MEWALDT, R.; CHRISTIAN, E.; MARGOLIES, D.; ORMES, J.; SNOW, F. The advanced composition explorer. **Space Science Reviews**, v. 86, n. 1-4, p. 1–22, 1998. 29
- TURNER, D. L.; SHPRITS, Y.; HARTINGER, M.; ANGELOPOULOS, V. Explaining sudden losses of outer radiation belt electrons during geomagnetic storms. **Nature Physics**, v. 8, n. 3, p. 208, 2012. 20, 21, 35
- YUMOTO, K. External and internal sources of low-frequency mhd waves in the magnetosphere—a review. **Journal of Geomagnetism and Geoelectricity**, v. 40, n. 3, p. 293–311, 1988. 17

ZELL, H. **Radiation belts with satellites**. 2013. Disponível em:  
<[https://www.nasa.gov/mission\\_pages/sunearth/news/gallery/20130228-radiationbelts.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/news/gallery/20130228-radiationbelts.html)>. Acesso em: 16 jan. 2019. 10



## PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE

### **Teses e Dissertações (TDI)**

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

### **Manuais Técnicos (MAN)**

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

### **Notas Técnico-Científicas (NTC)**

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programas de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

### **Relatórios de Pesquisa (RPQ)**

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

### **Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)**

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

### **Publicações Didáticas (PUD)**

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

### **Publicações Seriadas**

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Contam destas publicações o Internacional Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

### **Programas de Computador (PDC)**

São a seqüência de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. Aceitam-se tanto programas fonte quanto os executáveis.

### **Pré-publicações (PRE)**

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.