



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

Dinâmica do fluxo de elétrons de alta energia no cinturão externo de radiação: estudo observacional e de instrumentação

RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA (PIBIC/INPE/CNPq)

Ângelo Augusto Santos Marcolin (Escola de Engenharia de Lorena, Bolsista PIBIC/CNPq)
E-mail: angelo.marcolin@usp.br

Lígia Alves da Silva (CEA/DGE, Orientador)
E-mail: ligia.silva@inpe.br

COLABORADORES

Dr. Marlos Rockenbach (CEA/INPE)

Julho de 2018

Lista de ilustrações

Figura 1	– (a) Dinâmica dos cinturões de Van Allen. (b) Dinâmica da magnetosfera.	14
Figura 2	– Movimento das partículas no cinturão de Van Allen.	14
Figura 3	– O satélite da RBSP com seus detectores sinalizados.	16
Figura 4	– Imagem real do REPT.	16
Figura 5	– O satélite ACE.	19
Figura 6	– Localização dos cones de perda.	21
Figura 7	– Exemplo de um gráfico no qual ocorre um evento de dropout. Neste gráfico é possível visualizar a mudança de cor do amarelo alaranjado para o azul. O evento ocorreu em 12/07/2014.	22
Figura 8	– Imagem de uma CME ocorrida em 2012. A CME pode ser observada a partir das regiões mais claras no entorno do sol.	23
Figura 9	– (em cima) Valor de r_0 em função de B_z . (em baixo) Valor de α em função de D_p . Os losangos mostram os valores de medições <i>in situ</i>	25
Figura 10	– (a) Fluxo de elétrons no nível de 2.6 MeV em função de L^* (eixo vertical) e do tempo (eixo horizontal); (b) Fluxo de elétrons nos níveis de 1.8 MeV, 2.1 MeV, 2.6 MeV e 3.4 MeV para $L^* = 4.5$, correspondente ao eixo horizontal pontilhado do primeiro painel; (c) Velocidade do vento solar (V_{SW}); (d) Densidade da estrutura solar (Np); (e) Componentes B_x e B_y do IMF; (f) Componente B_z do IMF; (g) Compressão da magnetopausa calculada a partir do modelo de (SHUE; SONG et al., 1998). Os fluxos de elétrons são obtidos a partir dos dados do instrumento REPT a bordo das sondas de Van Allen. Os dados V_{SW} , B_x , B_y , B_z e a compressão da magnetopausa são obtidos a partir de instrumentos instalados no satélite ACE em órbita no ponto Lagrangeano L1.	27
Figura 11	– (a) Fluxo de elétrons no nível de 2.6 MeV em função de L^* (eixo vertical) e do tempo (eixo horizontal); (b) Fluxo de elétrons nos níveis de 1.8 MeV, 2.1 MeV, 2.6 MeV e 3.4 MeV para $L^* = 5.0$, correspondente ao eixo horizontal pontilhado do primeiro painel; (c) Velocidade do vento solar (V_{SW}); (d) Densidade da estrutura solar (Np); (e) Componentes B_x e B_y do IMF; (f) Componente B_z do IMF; (g) Compressão da magnetopausa calculada a partir do modelo de (SHUE; SONG et al., 1998). Os fluxos de elétrons são obtidos a partir dos dados do instrumento REPT a bordo das sondas de Van Allen. Os dados V_{SW} , B_x , B_y , B_z e a compressão da magnetopausa são obtidos a partir de instrumentos instalados no satélite ACE em órbita no ponto Lagrangeano L1.	28

Figura 12 – (a) Fluxo de elétrons no nível de 2.6 MeV em função de L^* (eixo vertical) e do tempo (eixo horizontal); (b) Fluxo de elétrons nos níveis de 1.8 MeV, 2.1 MeV, 2.6 MeV e 3.4 MeV para $L^* = 4.1$, correspondente ao eixo horizontal pontilhado do primeiro painel; (c) Velocidade do vento solar (V_{SW}); (d) Densidade da estrutura solar (Np); (e) Componentes B_x e B_y do IMF; (f) Componente B_z do IMF; (g) Compressão da magnetopausa calculada a partir do modelo de (SHUE; SONG et al., 1998). Os fluxos de elétrons são obtidos a partir dos dados do instrumento REPT a bordo das sondas de Van Allen. Os dados V_{SW} , B_x , B_y , B_z e a compressão da magnetopausa são obtidos a partir de instrumentos instalados no satélite ACE em órbita no ponto Lagrangeano L1.	30
Figura 13 – (a) Fluxo de elétrons no nível de 2.6 MeV em função de L^* (eixo vertical) e do tempo (eixo horizontal); (b) Fluxo de elétrons nos níveis de 1.8 MeV, 2.1 MeV, 2.6 MeV e 3.4 MeV para $L^* = 4.1$, correspondente ao eixo horizontal pontilhado do primeiro painel; (c) Velocidade do vento solar (V_{SW}); (d) Densidade da estrutura solar (Np); (e) Componentes B_x e B_y do IMF; (f) Componente B_z do IMF; (g) Compressão da magnetopausa calculada a partir do modelo de (SHUE; SONG et al., 1998). Os fluxos de elétrons são obtidos a partir dos dados do instrumento REPT a bordo das sondas de Van Allen. Os dados V_{SW} , B_x , B_y , B_z e a compressão da magnetopausa são obtidos a partir de instrumentos instalados no satélite ACE em órbita no ponto Lagrangeano L1.	31
Figura 14 – Posição das probes A e B (a esquerda), na data do evento detectado e captura da superfície solar em 09/09/2014 às 19:11:12 UT.	32
Figura 15 – Posição das probes A e B (a esquerda), na data do evento detectado e captura da superfície solar em 17/12/2014 às 09:56:12 UT.	33
Figura 16 – Posição das probes A e B (a esquerda), na data do evento detectado e captura da superfície solar em 13/03/2015 às 15:56:48 UT.	34
Figura 17 – Posição das probes A e B (a esquerda), na data do evento detectado e captura da superfície solar em 21/06/2015 às 07:56:36 UT.	35
Figura 18 – (a) Fluxo de elétrons no nível de 2.6 MeV em função de L^* (eixo vertical) e do tempo (eixo horizontal); (b) Fluxo de elétrons nos níveis de 1.8 MeV, 2.1 MeV, 2.6 MeV e 3.4 MeV para $L^* = 5.2$, correspondente ao eixo horizontal pontilhado do primeiro painel; (c) Velocidade do vento solar (V_{SW}); (d) Densidade da estrutura solar (Np); (e) Componentes B_x e B_y do IMF; (f) Componente B_z do IMF; (g) Compressão da magnetopausa calculada a partir do modelo de (SHUE; SONG et al., 1998). Os fluxos de elétrons são obtidos a partir dos dados do instrumento REPT a bordo das sondas de Van Allen. Os dados V_{SW} , B_x , B_y , B_z e a compressão da magnetopausa são obtidos a partir de instrumentos instalados no satélite ACE em órbita no ponto Lagrangeano L1.	36

Figura 19 – (a) Fluxo de elétrons no nível de 2.6 MeV em função de L^* (eixo vertical) e do tempo (eixo horizontal); (b) Fluxo de elétrons nos níveis de 1.8 MeV, 2.1 MeV, 2.6 MeV e 3.4 MeV para $L^* = 5.7$, correspondente ao eixo horizontal pontilhado do primeiro painel; (c) Velocidade do vento solar (V_{SW}); (d) Densidade da estrutura solar (Np); (e) Componentes B_x e B_y do IMF; (f) Componente B_z do IMF; (g) Compressão da magnetopausa calculada a partir do modelo de (SHUE; SONG et al., 1998). Os fluxos de elétrons são obtidos a partir dos dados do instrumento REPT a bordo das sondas de Van Allen. Os dados V_{SW} , B_x , B_y , B_z e a compressão da magnetopausa são obtidos a partir de instrumentos instalados no satélite ACE em órbita no ponto Lagrangeano L1.	37
Figura 20 – (a) Fluxo de elétrons no nível de 2.6 MeV em função de L^* (eixo vertical) e do tempo (eixo horizontal); (b) Fluxo de elétrons nos níveis de 1.8 MeV, 2.1 MeV, 2.6 MeV e 3.4 MeV para $L^* = 4.5$, correspondente ao eixo horizontal pontilhado do primeiro painel; (c) Velocidade do vento solar (V_{SW}); (d) Densidade da estrutura solar (Np); (e) Componentes B_x e B_y do IMF; (f) Componente B_z do IMF; (g) Compressão da magnetopausa calculada a partir do modelo de (SHUE; SONG et al., 1998). Os fluxos de elétrons são obtidos a partir dos dados do instrumento REPT a bordo das sondas de Van Allen. Os dados V_{SW} , B_x , B_y , B_z e a compressão da magnetopausa são obtidos a partir de instrumentos instalados no satélite ACE em órbita no ponto Lagrangeano L1.	38
Figura 21 – (a) Fluxo de elétrons no nível de 2.6 MeV em função de L^* (eixo vertical) e do tempo (eixo horizontal); (b) Fluxo de elétrons nos níveis de 1.8 MeV, 2.1 MeV, 2.6 MeV e 3.4 MeV para $L^* = 5.0$, correspondente ao eixo horizontal pontilhado do primeiro painel; (c) Velocidade do vento solar (V_{SW}); (d) Densidade da estrutura solar (Np); (e) Componentes B_x e B_y do IMF; (f) Componente B_z do IMF; (g) Compressão da magnetopausa calculada a partir do modelo de (SHUE; SONG et al., 1998). Os fluxos de elétrons são obtidos a partir dos dados do instrumento REPT a bordo das sondas de Van Allen. Os dados V_{SW} , B_x , B_y , B_z e a compressão da magnetopausa são obtidos a partir de instrumentos instalados no satélite ACE em órbita no ponto Lagrangeano L1.	39
Figura 22 – Posição das probes A e B (a esquerda), na data do evento detectado e captura da superfície solar em 04/02/2014 às 17:14:13 UT.	40
Figura 23 – Posição das probes A e B (a esquerda), na data do evento detectado e captura da superfície solar em 09/03/2014 às 17:11:36 UT.	40
Figura 24 – Posição das probes A e B (a esquerda), na data do evento detectado e captura da superfície solar em 13/02/2015 às 12:12:12 UT.	41
Figura 25 – Posição das probes A e B (a esquerda), na data do evento detectado e captura da superfície solar em 23/06/2015 às 17:12:00 UT.	41

Lista de tabelas

Tabela 1 – Pré-requisitos dos parâmetros de medição das partículas no cinturão de Van Allen de acordo com as especificações do programa Van Allen.	21
--	----

Lista de abreviaturas e siglas

MI - Meio interplanetário

CME - *Coronal Mass Ejection*

HSS - *High Speed Stream*

REPT - *Relativistic Electron Proton Telescope*

MAG - *Magnetic Field Experiment*

SWEPAM - *Solar Wind Electron, Proton and Alpha Monitor*

ACE - *Advanced Composition Explorer*

NASA - *National Aeronautics and Space Administration*

IMF - *Interplanetary Magnetic Field*

Agradecimentos

Gostaria de agradecer ao INPE, principalmente aos meus orientadores Lúgia Alves e Marlos Rockenbach por todo o apoio e paciência no desenvolvimento deste trabalho.

Gostaria de agradecer também a Universidade de São Paulo e a Escola de Engenharia de Lorena, por desenvolverem meu interesse no desenvolvimento de trabalhos acadêmicos.

Além disso, deixo meu agradecimento a Gamma Júnior Engenharia, empresa júnior em ascensão no Movimento Empresa Júnior, pois sem a mesma não teria tido a oportunidade de entrar em contato com um projeto tão enriquecedor acadêmica e pessoalmente.

Agradeço também à NASA pela disposição dos dados utilizados.

Um agradecimento à minha família que sempre esteve ao meu lado me apoiando de maneira incondicional.

Resumo

Partículas energizadas são aprisionadas pelo campo geomagnético formando os cinturões de radiação interno e externo, conhecidos como os cinturões de Van Allen. Estas partículas são submetidas às condições do meio interplanetário e da própria magnetosfera, e exercem movimentos periódicos complexos ao redor da Terra que estão diretamente relacionados às adiabáticas invariantes. O cinturão externo é significativamente mais instável, e sua dinâmica é altamente complexa ao interagir com estruturas do vento solar, aumentando (“*reformation*”) ou diminuindo (“*dropout*”) sua população de partículas aprisionada. O ambiente espacial, assim como, a atmosfera terrestre, podem sofrer grandes influências das instabilidades destas partículas. Essas são capazes de danificar equipamentos no ambiente espacial, comprometer a saúde dos astronautas e impactar química e/ou fisicamente as camadas da atmosfera neutra e ionizada. Para realizar estudos observacionais destas partículas são utilizados dados do instrumento REPT – *Relativistic Electron Proton Telescope*, que está a bordo do satélite Van Allen Probes. Os dados do satélite ACE fornecerão as condições do meio interplanetário. A metodologia empregada utiliza os conceitos teóricos dos impactos de estruturas de origem solar na magnetosfera, em que, são selecionados eventos de *dropout* que apresentam condições distintas do meio interplanetário. Os processos físicos e dinâmicos envolvidos nestes eventos foram analisados e descritos, e as variáveis que apresentam maior representatividade da estrutura solar foram destacadas. Com isso, este trabalho pode contribuir para o entendimento dos mecanismos envolvidos em eventos de *dropout* e oferecer subsídios para o aprimoramento dos modelos de partículas, no que diz respeito ao cálculo do coeficiente de difusão radial.

Palavras-chave: cinturão de radiação, Van Allen, *dropouts*.

Sumário

	Resumo	8
1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS	12
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
3.1	Primeiros avanços em detecção	13
3.2	Dinâmica da magnetosfera	13
3.3	O movimento padrão das partículas	13
3.4	Dados	15
3.4.1	<i>Radiation Belt Storm Probes Mission - RBSP</i>	15
3.4.1.1	<i>Relativistic Electron Proton Telescope - REPT</i>	15
3.4.2	<i>Advanced Composition Explorer - ACE</i>	17
4	METODOLOGIA	20
4.1	Critério de Seleção dos Eventos	20
4.2	Alta Energia	21
4.3	O Dropout	22
4.3.1	<i>O Magnetopause Shadowing</i>	22
4.3.2	<i>O Modelo de Shue 1998</i>	23
4.3.3	<i>Probes e Captação de Imagem Solar</i>	24
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
5.1	Eventos de <i>Coronal Mass Ejection</i>	26
5.1.1	<i>Evento: 13/09/2014</i>	26
5.1.2	<i>Evento: 21/12/2014</i>	28
5.1.3	<i>Evento: 17/03/2015</i>	29
5.1.4	<i>Evento: 22/06/2015</i>	29
5.1.5	<i>Posição das Van Allen Probes e Imagem da Superfície Solar</i>	31
5.2	Eventos de <i>High Speed Stream</i>	32
5.2.1	<i>Evento: 08/02/2014</i>	32
5.2.2	<i>Evento: 13/03/2014</i>	33
5.2.3	<i>Evento: 17/02/2015</i>	34
5.2.4	<i>Evento: 23/02/2015</i>	35
5.2.5	<i>Posição das Van Allen Probes e Imagem da Superfície Solar</i>	35
6	CONCLUSÃO	42

Bibliografia 43

1 Introdução

A região espacial, seja a magnetosfera ou o meio interplanetário (MI), sempre despertou interesse da comunidade científica devido às suas inúmeras questões em aberto e sua complexidade como um todo. Em consequência à isso, desde o lançamento do primeiro satélite, o Sputnik (satélite soviético lançado em outubro de 1957), o estudo, principalmente da região da magnetosfera, começou a ser aprofundado.

As novas possibilidades de medição *in situ* fizeram, em 1958, com que a missão *Explorer I* descobrisse uma nova região dentro da magnetosfera terrestre, chamada Cinturões de Van Allen (HUDSON et al., 2008). Por ser a região que age como um escudo terrestre, os cinturões estão no enfoque de estudos acadêmicos para que possa ser definida a dinâmica de partículas do ambiente e quais são as possíveis alterações que podem ocorrer, com a finalidade de desenvolver tecnologia que esteja minimamente preparada para suportar essas alterações.

Algumas dessas alterações, hoje em dia, já são bem conhecidas e possuem um estudo aprofundado. Por exemplo, o *Magnetopause Shadowing* (ALVES et al., 2016)(KEIKA et al., 2005)(MATSUMURA et al., 2011), evento cuja "compressão" da magnetosfera causa uma perda de partículas ao MI. Sabe-se também que a ressonância das interações onda-partícula dos elétrons podem causar um espalhamento do determinado ângulo *pitch* (ALVES et al., 2016)(SHPRITS et al., 2008) para o cone de perda ou o MI.

Um evento interessante ocorrido, do tipo citado, ocorreu em setembro de 2014, no qual duas densas ejeções de massa coronal atingiram a magnetosfera (ALVES et al., 2016), comprimindo-a até atingir a borda externa do cinturão externo.

2 Objetivos

O presente trabalho procura identificar e analisar oito eventos com características específicas que ainda não tenham sido "catalogados". Mais especificamente, deseja-se catalogar quatro eventos de *dropout* causados por ejeção de massa coronal (CME) e quatro eventos causados por *high speed stream* (HSS).

Os dados utilizados para análise foram disponibilizados através do instrumento REPT, a bordo do satélite Van Allen Probes-A, e dos instrumentos MAG e SWEPAM, a bordo do satélite ACE, ambos lançados pela NASA. Tais dados serão interpolados e plotados no ambiente Matlab para que o evento seja analisado. Após isso, dados mais específicos, como a velocidade do vento solar, a pressão dinâmica que se direcionam para a magnetosfera externa, entre outras características do evento serão analisadas para que possamos definir o tipo de evento em questão.

3 Fundamentação teórica

3.1 Primeiros avanços em detecção

Em 1958, na *Explorer I*, o que possibilitou a descoberta dos cinturões de Van Allen foi um contador Geiger embarcado, que é basicamente um sistema de detecção a gás (KNOLL, 1989) que detectou prótons e elétrons no campo magnético terrestre. Outras tentativas, como em 1959 e 1962, falharam em sua detecção devido à limitação dos detectores embarcados, ou seja, o valor do fluxo de partículas excedeu o limite dos instrumentos de medição desenvolvidos baseados nas prévias medições de raios cósmicos (HUDSON et al., 2008).

Já em 1990, a NASA conseguiu detectar uma injeção de partículas energizadas, provenientes de uma tempestade solar, na região entre os cinturões externo e interno (HUDSON et al., 2008). A partir daí, os estudos sobre as partículas dos cinturões começou a se intensificar.

3.2 Dinâmica da magnetosfera

A magnetosfera possui uma região na parte noturna, conhecida como Magnetocalda. As constantes interações com o vento solar, permite que o campo magnético 1 seja "empurrado" e estendido para parte de trás (em relação ao sol) da Terra. Dentre as várias regiões da magnetosfera, as mais relevantes para esse trabalho são, obviamente, a região dos cinturões. Porém, outras regiões também valem a pena serem citadas, como:

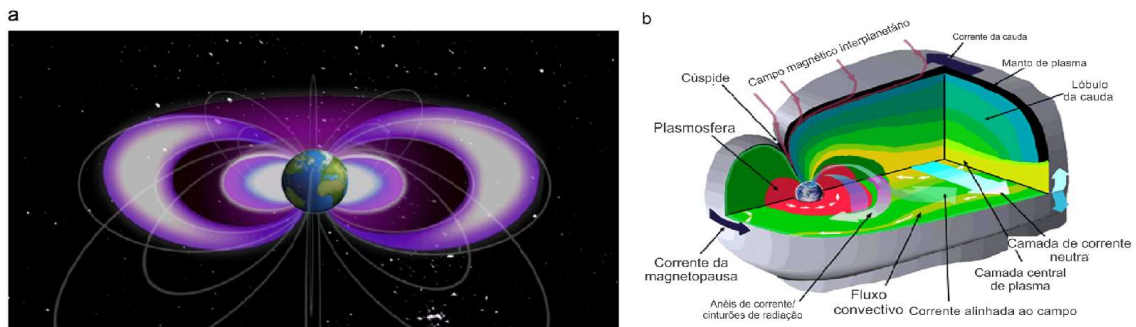
- **Magnetopausa:** região que delimita o fim da magnetosfera e o início do meio interplanetário.
- **Plasmasfera:** região entre os cinturões externo e a atmosfera terrestre.
- **Plasmapausa:** região de fronteira entre a plasmasfera e o cinturão externo.

Os cinturões possuem uma disposição espacial bem mais simplificada. Há simplesmente o cinturão interno, que compõe uma região entre 0.1 à 1.5 raios terrestres; e o cinturão externo, cuja região varia de 3.0 à 6.0 raios terrestres. O formato dos cinturões, assim como suas linhas de campo (que regem o movimento das partículas do cinturão), são demonstrados pela figura 1. No presente trabalho, foram analisados eventos ocorridos no cinturão externo.

3.3 O movimento padrão das partículas

Um dos pontos mais importantes na análise da dinâmica dos cinturões está no movimento médio das partículas. Essa importância fundamenta-se no fato de que, caso haja uma mudança brusca nessa dinâmica, o dados devem indicar que há alguma interação interplanetária (como uma tempestade solar) alterando os fluxos no cinturão.

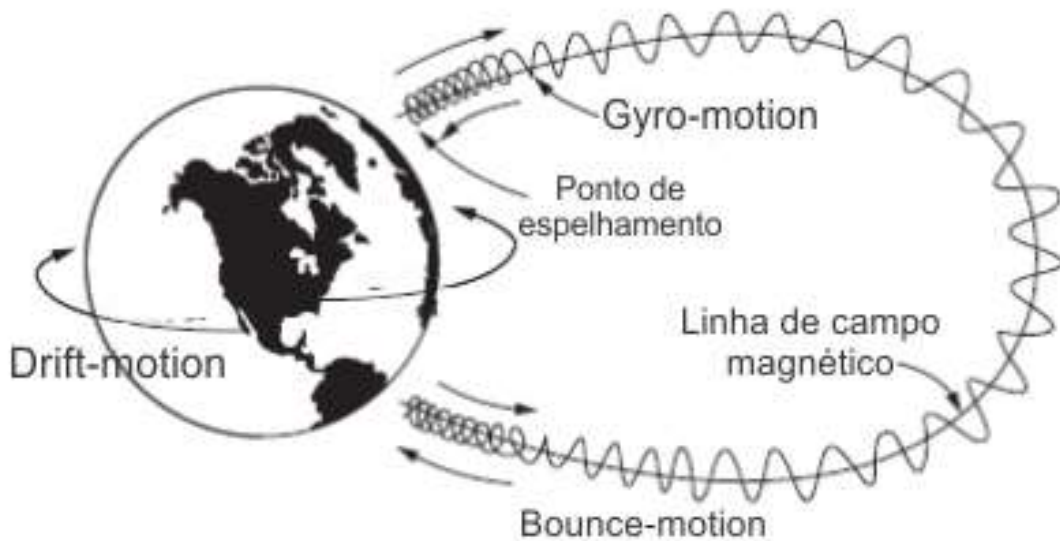
Figura 1 – (a) Dinâmica dos cinturões de Van Allen. (b) Dinâmica da magnetosfera.



Fonte: adaptado de (HUDSON et al., 2008).

São três os movimentos que regem a dinâmica das partículas no cinturão (TURNER et al., 2012) (figura 2). O *gyro-motion*, no qual as partículas circundam as linhas de campo magnético; o *bounce motion*, cujo as partículas alternam sua direção nos pontos de espelhamento magnético; e o *drift motion*, entorno da Terra, resultado do gradiente magnético.

Figura 2 – Movimento das partículas no cinturão de Van Allen.



Fonte: adaptado de (HEIKKILA, 2011).

Invariantes adiabáticas estão associadas com esses movimentos oscilatórios. A primeira invariante conserva o momento magnético da partícula e é proporcional ao quadrado do momento perpendicular dividido pela força magnética local; a segunda e terceira invariantes conservam a integral do momento paralelo em um período completo e o fluxo magnético entorno da órbita da partícula, respectivamente. Mudanças na magnetosfera são consideradas totalmente adiabáticas, ou seja, são totalmente reversíveis. Inicialmente, pensava-se que os *dropouts* no fluxo magnético eram adiabáticos. Essencialmente, os elétrons movem-se radialmente para fora (para dentro) durante a fase principal (de recuperação) da tempestade para conservar a terceira invariante.

Esse movimento preferencial é o que causa a variação na intensidade do fluxo enquanto a primeira invariante adiabática é conservada. Após pesquisas, foi descoberto que muitos *dropouts* no fluxo não retornam ao nível encontrado antes da tempestade. Essas perdas ocorrem na magnetopausa.

3.4 Dados

3.4.1 *Radiation Belt Storm Probes Mission* - RBSP

Após o descobrimento dos cinturões, no fim da década de 50, houve um aumento na área de pesquisa espacial. Modelagens da distribuição das partículas na região da magnetosfera, para estimar a influência de elétrons e íons em missões espaciais e em astronautas, já eram realizadas desde a década de 70 (MAUK et al., 2012). Após 2012, a pesquisa científica relacionada à essa área se intensificou ainda mais com a missão *Radiation Belt Storm Probes*.

Já se sabe muito sobre os cinturões e ainda há muito a ser descoberto, por isso a missão RBSP é importante. Por exemplo, sabe-se que a interação entre o vento solar, a magnetosfera e os cinturões de Van Allen é muito intensa e, no *Magnetopause Shadowing* (evento no qual o cinturão externo pode perder parcialmente a proteção da magnetosfera), partículas podem ser lançadas com um ângulo pitch¹ para dentro da atmosfera terrestre e causar dano em equipamentos, tais como rádios e sistemas de monitoramento de aeronaves.

O objetivo da missão RBSP da NASA é determinar como as populações de partículas de alta energia são criadas e qual o seu comportamento, especificamente na região dos cinturões de Van Allen. Os dois satélites (figura 3), *Van Allen Probe - A* e *Van Allen Probe - B*, foram lançados em agosto de 2012 (MAUK et al., 2012). Ambos satélites possuem os mesmos instrumentos de medição de partículas, campo eletromagnético e das ondas que interagem com a magnetosfera. Nessa missão, dois aspectos são essenciais para as questões científicas. Os satélites devem enviar dados de múltiplos pontos no espaço inserido e em várias escalas temporais. Além disso, os instrumentos de medição devem possuir alta resolução em suas medições.

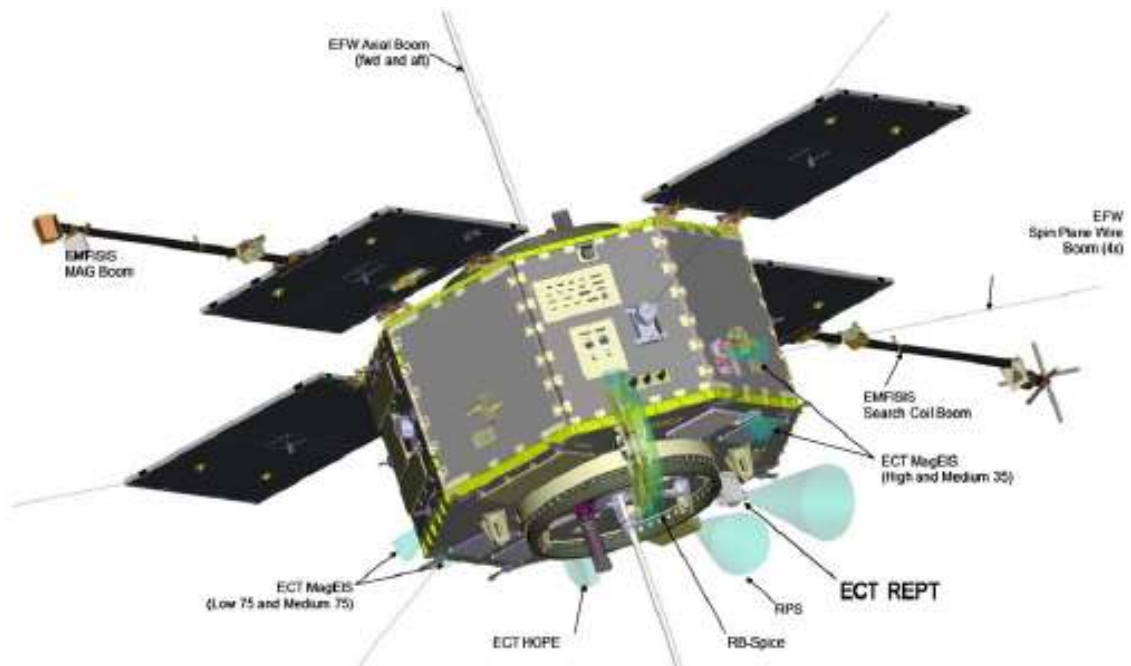
3.4.1.1 *Relativistic Electron Proton Telescope* - REPT

No estudo dos elétrons e prótons de altas energias nos cinturões de Van Allen foi necessário o desenvolvimento de um detector cuidadosamente projetado para essa missão. O *Relativistic Electron Proton Telescope* (figura 4) foi desenvolvido para a missão RBSP, para detectar elétrons na faixa de energia de milhões de elétron-volts (MeV). A detecção nessa faixa é necessária para que os processos de aceleração e perda de partículas e os efeitos da corrente de anel possam ser completamente entendidos.

Os detectores a bordo do REPT são capazes de fornecer informações suficientes para esclarecer a veracidade de modelagens de acelerações das partículas, assim como, seus dados podem confirmar quais regiões no cinturão são mais relevantes para estudos da evolução temporal. A alta acurácia das detecções é garantida, uma vez que o REPT obtém medidas na faixa de energia e no ângulo *pitch* em posição ideal (equatorial) que podem ser projetadas para as maiores

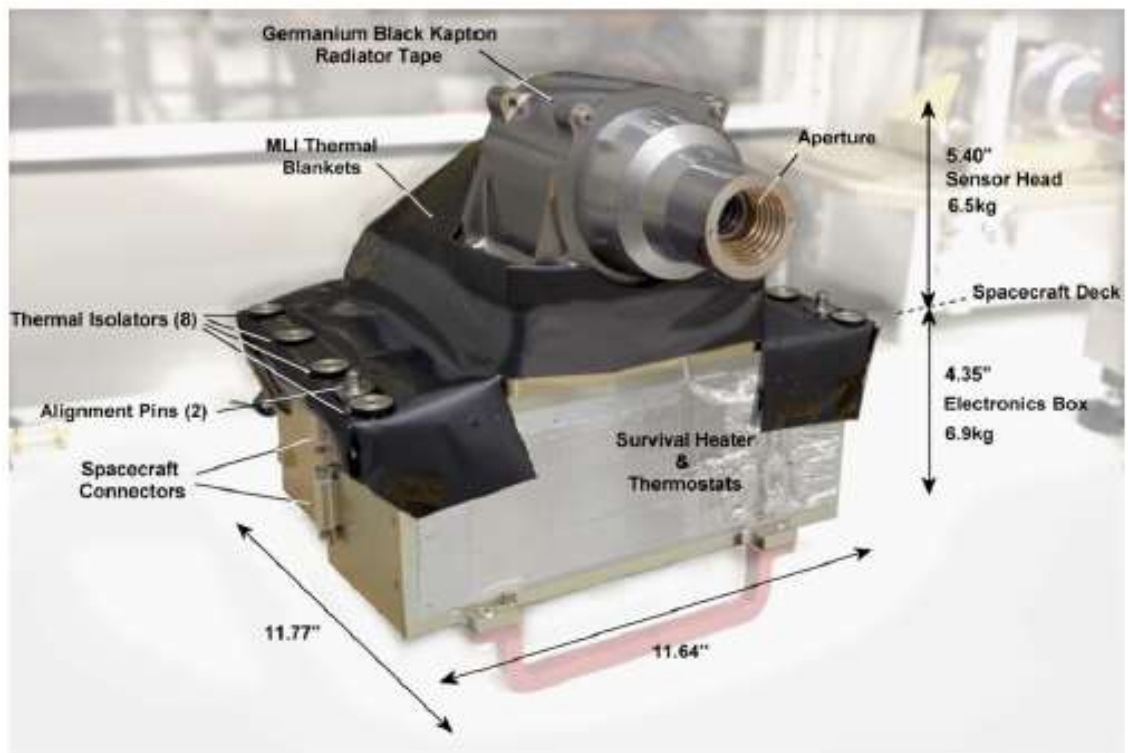
¹ Ângulo entre o vetor velocidade da partícula e o vetor campo magnético onde a partícula está inserida.

Figura 3 – O satélite da RBSP com seus detectores sinalizados.



Fonte: (BAKER, D. N. et al., 2012).

Figura 4 – Imagem real do REPT.



Fonte: (BAKER, D. N. et al., 2012).

latitudes (BAKER, D. N. et al., 2012), concluindo uma completa análise espacial do instante analisado.

Para melhor se alinhar com a missão RBSP, o REPT foi geometricamente otimizado para atingir um maior alcance e precisão, dentro dos limites das *Van Allen Probes*. Com isso, o instrumento consegue realizar medições do fluxo de elétrons e prótons nos cinturões dentro de uma faixa que vai de 10^{-2} até 10^6 elétrons/cm² MeV, faixa satisfatória dentro do objetivo da missão.

3.4.2 *Advanced Composition Explorer - ACE*

O objetivo primário do satélite ACE (figura 5) é determinar e comparar a composição elementar e identificar quais isótopos estão presentes na região de análise do MI. O sol é estudado a partir de medições da composição do vento solar, das CMEs e das partículas energizadas oriundas de alguma ocorrência no próprio sol ou de alguma alteração no MI.

O desenvolvimento do satélite foi realizado de maneira não-tradicional, dentro dos padrões da NASA. Devido ao grande número de instrumentos de medição, o mal funcionamento de um instrumento não prejudicaria gravemente o objetivo científico da missão. Por isso, o maior responsável pelo desenvolvimento dos instrumentos, sob a supervisão da NASA, foi a Caltech que focou seus esforços em não estourar o orçamento e respeitar o prazo de entrega. Surpreendentemente, todos os nove medidores funcionaram perfeitamente.

O satélite foi lançado em 1997 (STONE et al., 1998), em direção ao MI, e seus instrumentos e carga deveriam funcionar por, no mínimo, dois anos. Mesmo assim, o ACE possuía hidrazina e outros gases estocados suficiente para funcionar por cinco anos.

Mesmo com a baixa supervisão, para atingir o mínimo requisito científico, os instrumentos do ACE possuem alta precisão de medição e uma resolução temporal adequada à dinâmica do MI. Os nove instrumentos presentes no ACE (STONE et al., 1998) estão listados abaixo.

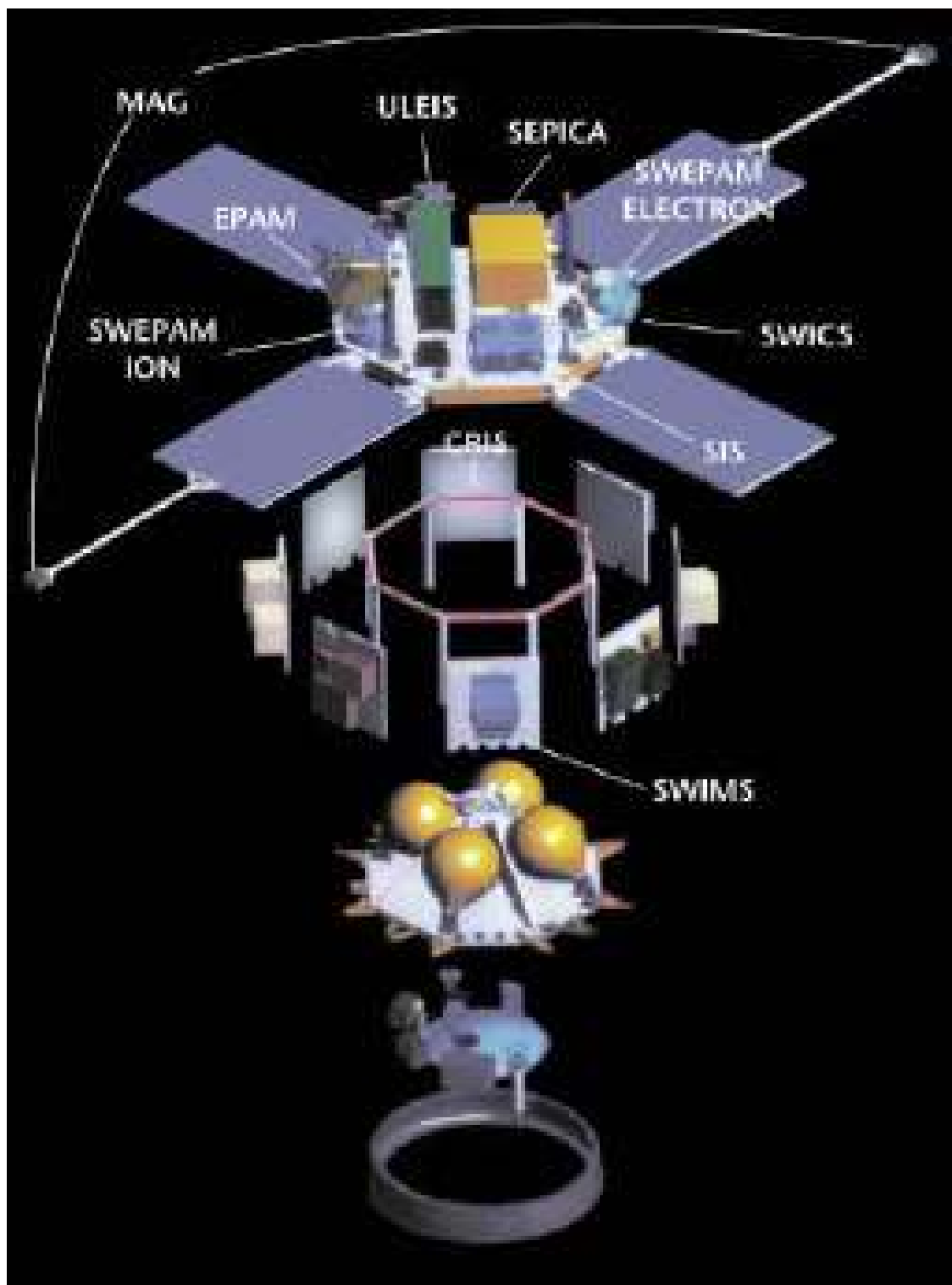
- CRIS - *Cosmic-ray isotope spectrometer*
- SIS - *Solar isotope spectrometer*
- ULEIS - *Ultra low-energy isotope spectrometer*
- SEPICA - *Solar energetic particle ionic charge analyzer*
- EPAM - *Eletron, proton and alpha monitor*
- SWIMS - *Solar wind ion mass spectrometer*
- SWICS - *Solar wind ion composition spectrometer*
- SWEPAM - *Solar wind electron, proton and alpha monitor*
- MAG - *Magnetometer*

Nesta pesquisa, foram utilizados dados dos dois últimos instrumentos.

- 1) O **SWEPAM** foi desenvolvido para realizar medições tridimensionais das características do vento solar, elétrons na faixa de ~ 1 a 900 eV e íons energizados de 0.26 a 35 keV (STONE et al., 1998).
- 2) O **MAG** é um magnetômetro que analisa o comportamento dinâmico do vetor campo magnético do MI, incluindo choques interplanetários, ondas e outras características que regem a aceleração e transporte das partículas energizadas.

A localização de ambos instrumentos no ACE pode ser verificada na figura 5.

Figura 5 – O satélite ACE.



Fonte: (STONE et al., 1998).

4 Metodologia

4.1 Critério de Seleção dos Eventos

Partículas energizadas são aprisionadas pelo campo geomagnético formando os cinturões de radiação interno ($\sim 1\text{Re} - 1.5\text{Re}$) e externo ($\sim 3\text{Re} - 6\text{Re}$), conhecidos como os cinturões de Van Allen. Estas partículas, que podem ser prótons, elétrons ou íons, são submetidas as condições da magnetosfera interna, e exercem movimentos periódicos complexos ao redor da Terra que variam adiabaticamente (NORTHROP; TELLER, 1960)(ROEDERER, 1970)(SHABANSKY, 1971)(UKHORSKIY; SITNOV, 2012). A maior população do cinturão interno é composta por prótons e do cinturão externo por elétrons. O cinturão externo é significativamente mais instável, e sua dinâmica é altamente complexa ao interagir com estruturas do vento solar, aumentando (*reformation*) ou diminuindo (*dropout*) sua população de partículas aprisionadas (BLAKE et al., 1992)(SCHULTZ, 2013)(BAKER, D.; KANEKAL, 2008)(ARTEMYEV et al., 2013)(ALVES et al., 2016).

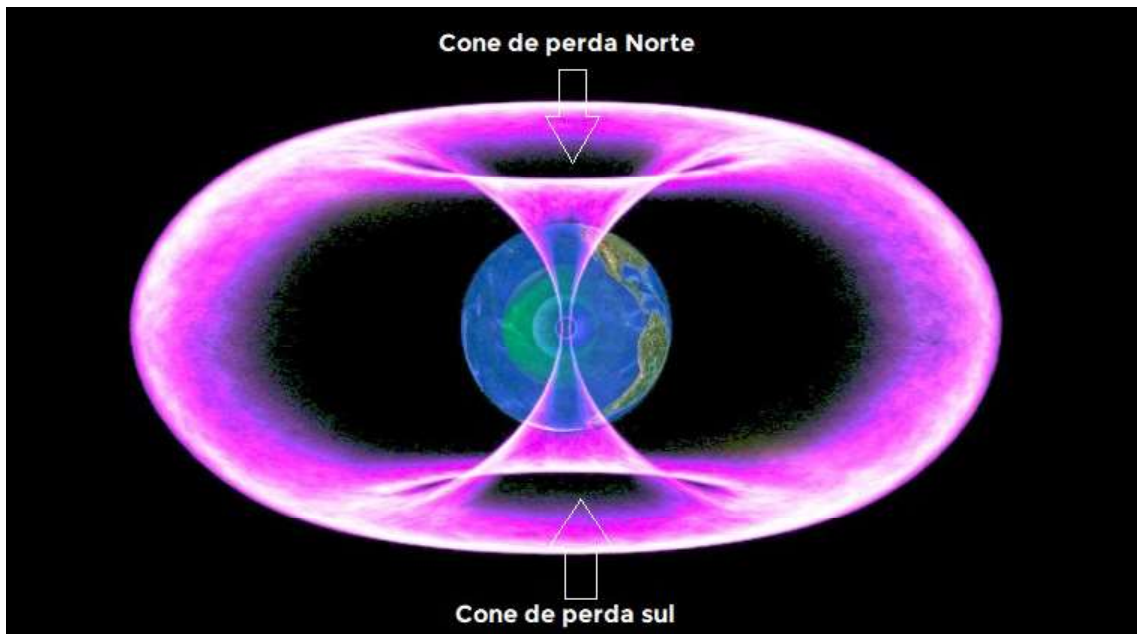
Esse trabalho possui enfoque em eventos de *dropout*, mais especificamente, *dropouts* originados por CME e HSS. O início da metodologia foi baseado em duas bases de dados encontradas online. A primeira, que lista eventos de CME, é a lista de Richardson (RICHARDSON; CANE, 2017). A segunda lista, utilizada para escolher, inicialmente, os eventos de HSS, é a *Space Weather Database Of Notifications, Knowledge, Information*, conhecida por DONKI¹ e disponibilizada pela NASA. Foram analisados dados de 2012 à 2015 e alguns critérios foram estabelecidos para escolha e análise dos eventos. Para que seja realizado um correto reconhecimento desse tipo de evento, algumas características específicas devem ser analisadas.

- **Fluxo de elétrons:** esse é o principal item a ser analisado. Como o próprio termo *dropout* sugere, esse evento é caracterizado por uma abrupta queda no fluxo de elétrons. Para ser considerado um evento de *dropout*, o fluxo de elétrons deve decair em pelo menos uma ordem de grandeza.
- **Velocidade do Vento Solar:** a velocidade do vento solar é um indicador de que alguma extensa massa, oriunda do sol, foi ejetada e se direciona a Terra para interagir com a magnetosfera. Em eventos de *dropout*, é interessante analisar quando ocorre um aumento nessa velocidade.
- **O meio interplanetário:** o campo magnético do MI atuando na magnetopausa, em especial sua componente cartesiana "z", também é um dos focos de análise, pois pode sinalizar uma tendência de compressão da magnetopausa, o que favorece eventos de *dropout*.
- **Compressão da Magnetopausa:** a posição da magnetopausa no momento do evento é outro ponto crucial na análise espacial. O *Magnetopause Shadowing*, evento no qual a

¹ Link da plataforma: <https://ccmc.gsfc.nasa.gov/donki/>

magnetopausa é comprimida em relação a sua posição inicial e a Terra, pode ocorrer de maneira intensa, proporcionando a altura da magnetopausa atingir a região externa do cinturão externo. Quando isso acontece, os movimentos padrões das partículas, mostrado na figura 2, não são mantidos e as partículas podem escapar da região do cinturão para o MI ou para uma região chamada cone de perda (figura 6), localizada nos pólos, norte e sul, terrestres.

Figura 6 – Localização dos cones de perda.



Fonte: adaptado da internet.

4.2 Alta Energia

A classificação de energias na região do cinturão é feita da seguinte maneira (tabela 1):

Tabela 1 – Pré-requisitos dos parâmetros de medição das partículas no cinturão de Van Allen de acordo com as especificações do programa Van Allen.

Medições	Faixas de Energia (MeV)
Elétrons de alta energia	1 ~ 10
Elétrons de média energia	0.05 ~ 1
Prótons de alta energia	20 ~ 75
Prótons de média energia	0.1 ~ 1
Íons de média energia	0.02 ~ 0.3
Íons/Elétrons de baixa energia	50eV ~ 0.05MeV

Fonte: adaptado de (MAUK et al., 2012).

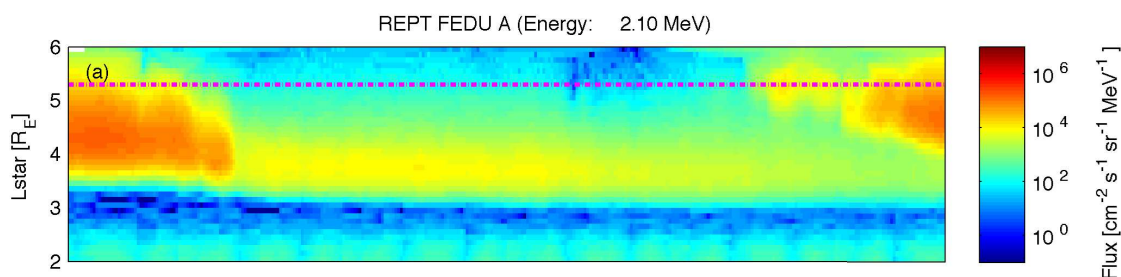
Portanto, seguindo os dados da tabela 1, o presente projeto irá focar em elétrons com energia de 1 ~ 10 MeV. Mais especificamente, foram utilizados os dados de partículas eletricamente carregadas entre 1.8 ~ 3.6 MeV.

4.3 O Dropout

O *dropout* é um dos muitos eventos estudados que ocorrem nos cinturões de Van Allen. Como o próprio nome já sugere, nesse evento ocorre a diminuição da quantidade de partículas no meio estudado.

Há várias maneiras de visualizar este evento. Uma delas, como já realizado por (ALVES et al., 2016), é a observação do fluxo de partículas (figura 7) em um determinado período de tempo. Só é considerado indício de *dropout* quando há uma queda de no mínimo uma ordem de grandeza no fluxo eletrônico.

Figura 7 – Exemplo de um gráfico no qual ocorre um evento de dropout. Neste gráfico é possível visualizar a mudança de cor do amarelo alaranjado para o azul. O evento ocorreu em 12/07/2014.



Fonte: adaptado de (ALVES et al., 2016).

4.3.1 O Magnetopause Shadowing

Dentre as várias causas de um *dropout*, o presente projeto de iniciação científica possui enfoque nos eventos de perda causados pelo *magnetopause shadowing*.

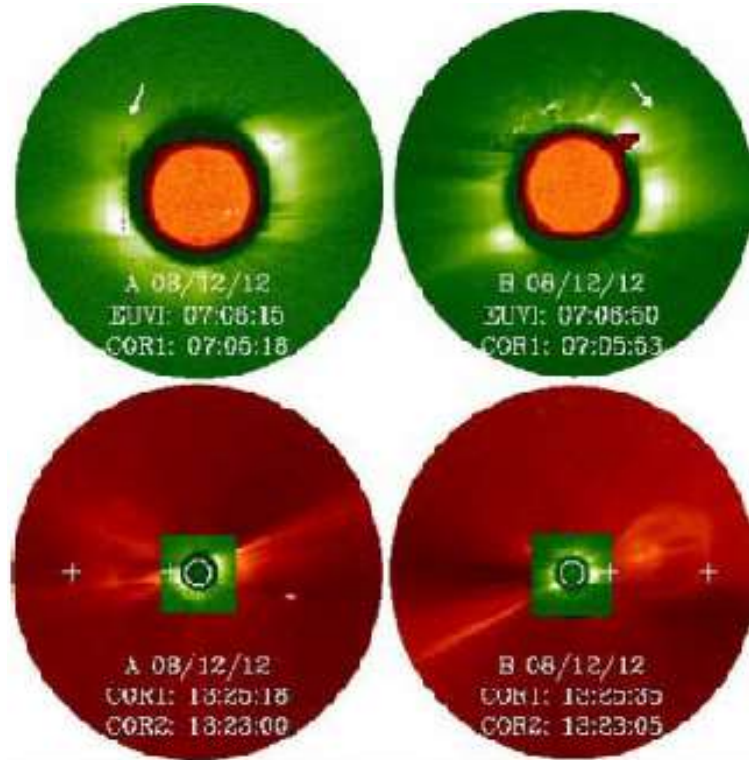
A dinâmica da magnetosfera é extremamente complexa. Seus extremos e locais mais importantes possuem sua localização variável durante todo o tempo. A magnetopausa, região mais externa, considerada o primeiro escudo natural terrestre, está em constante interação com o vento solar e, devido à isso, possui sua localização flutuando em torno de $12R_E^2$.

Quando há formação de CMEs (figura 8), pode ocorrer um súbito aumento da velocidade do vento solar em direção ao globo terrestre. Isso pode indicar que a massa coronal ejetada está sendo carregada pelo gradiente eletromagnético presente no MI. Ao atingir a região da magnetopausa, essa grande massa pode comprimir a região a valores alturas próximas ao cinturão externo. Tal compressão é chamada de *magnetopause shadowing*.

Quando o cinturão externo de Van Allen perde a proteção da magnetosfera, as partículas energizadas podem perder seus movimentos característicos e se perderem para o MI ou, inclusive, decaírem sobre a atmosfera terrestre.

² O termo "Re" é uma unidade de medida de distâncias chamada "raios terrestres". $1R_E$ é equivalente aproximadamente à $6.371 \times 10^3 \text{ km}$ (CHAMBAT; VALETTE, 2001)

Figura 8 – Imagem de uma CME ocorrida em 2012. A CME pode ser observada a partir das regiões mais claras no entorno do sol.



Fonte: adaptado de (LIU et al., 2010).

4.3.2 O Modelo de Shue 1998

A posição da magnetopausa é um parâmetro relevante, pois ela é a última estrutura que separa o plasma magnetosférico do vento solar e do MI. O primeiro conceito da localização da magnetopausa foi introduzido por (CHAPMAN; FERRARO, 1931). Nesse modelo, apenas a pressão dinâmica era considerada. Porém, 40 anos depois, (FAIRFIELD, 1971) mostrou que a orientação do IMF também deve influenciar a magnetopausa. A partir disso, os modelos foram sendo aperfeiçoados.

Em 1997, J.H. Schue desenvolveu um modelo matemático (SHUE; CHAO et al., 1997) para calcular a distância da magnetopausa:

$$r = r_0 \left(\frac{2}{1 + \cos\theta} \right)^\alpha, \quad (4.1)$$

no qual r é a distância radial e θ é o ângulo *zenith* solar. Os parâmetros r_0 e α são, respectivamente, a posição média da magnetopausa e a intensidade da *tail flaring* da magnetosfera. Além disso, r_0 e α dependem da componente B_z do IMF e da pressão dinâmica do vento solar (D_p). Obtém-se, portanto:

$$r_0 = \left[\begin{array}{l} (11.4 + 0.013B_z)(D_p)^{-\frac{1}{66}}, \text{ para } B_z \geq 0 \\ (11.4 + 0.14B_z)(D_p)^{-\frac{1}{66}}, \text{ para } B_z < 0 \end{array} \right] \quad (4.2)$$

$$\alpha = (0.58 - 0.013B_z)(1 + 0.010D_p). \quad (4.3)$$

Concluindo assim, o modelo de (SHUE; CHAO et al., 1997).

Entretanto, por melhor que seja esse modelo, melhorias podem ser feitas para aproximar ainda mais os resultados modelados das medições *in situ*.

Para melhorar seu modelo, Schue ajustou r_0 a uma tangente hiperbólica em função de B_z e α foi ajustado com um logaritmo natural. Além disso, no modelo de (schue1997), r_0 possuía duas formulações, uma para cada orientação de B_z . Porém, em seu novo modelo, isso foi ajustado para uma só equação, obtendo então:

$$r_0 = 10.22 + 1.29 \tanh[0.184(B_z + 8.14)](D_p)^{-\frac{1}{66}} \quad (4.4)$$

$$\alpha = (0.58 - 0.007B_z)[1 + 0.024 \ln(D_p)] \quad (4.5)$$

Na figura 9, pode-se observar uma comparação entre os dois modelos.

4.3.3 Probes e Captação de Imagem Solar

A título de curiosidade, foi utilizado um site, o *Science Gateway*³ do projeto *Van Allen Probes*, para que fosse observada as posições dos satélites (probe A e B) no momento da detecção do evento. O horário de observação vou determinado visualmente a partir das plotagens dos dados dos *dropouts*.

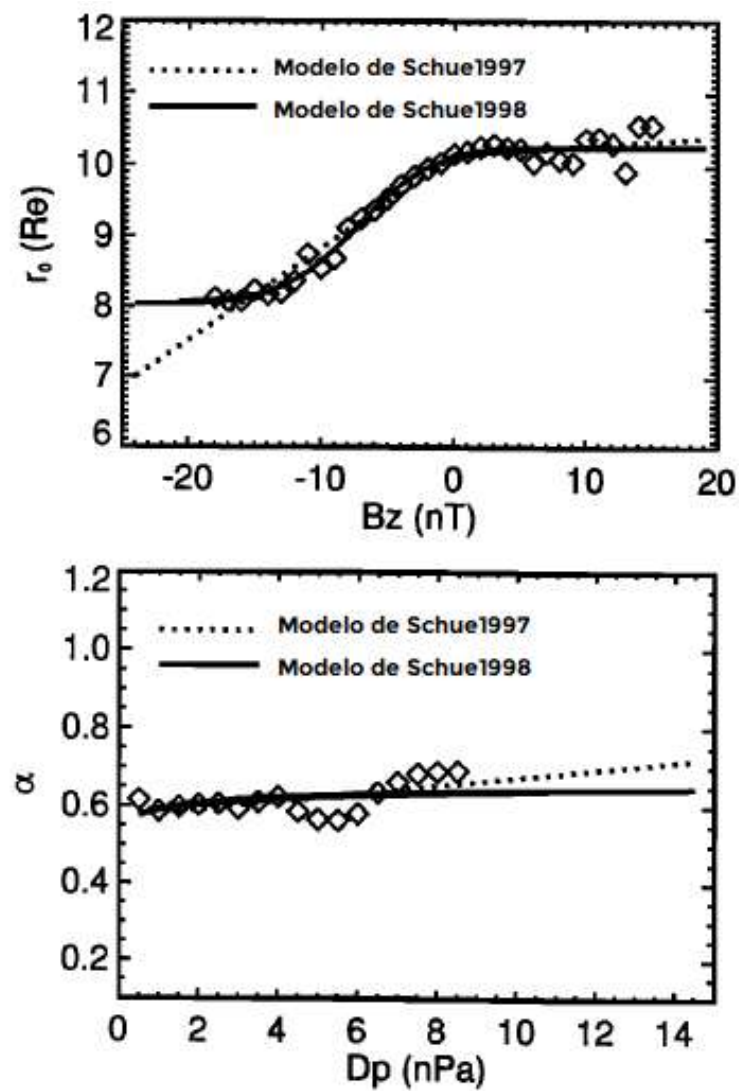
Já a situação do sol pode ser observada a partir de um outro site, assim como o anterior, disponibilizado pela NASA, o *Solar Dynamics Observatory*⁴, conhecida como **SDO**. Foi realizado um cálculo simples⁵ para estimar o momento em que o evento se originou na superfície solar.

³ Link da plataforma: <http://rbspgateway.jhuapl.edu/>

⁴ Link da plataforma: <https://sdo.gsfc.nasa.gov/>

⁵ A distância entre a Terra e o Sol é $1.496 \times 10^8 km$ (DIAS; PIASSI, 2007)

Figura 9 – (em cima) Valor de r_0 em função de B_z . (em baixo) Valor de α em função de D_p . Os losangos mostram os valores de medições *in situ*.



Fonte: adaptado de (SHUE; SONG et al., 1998).

$$\Delta t = \frac{S_{terra \rightarrow sol}}{V_{m\u00e9dia}} \quad (4.6)$$

sendo :

$$V_{m\u00e9dia} \approx \frac{V_{m\u00e1x} - V_{m\u00edn}}{2} \quad (4.7)$$

5 Resultados e Discussão

Os resultados apresentados a seguir, utilizam a metodologia desenvolvida durante o projeto de iniciação científica. Contudo, os dois eventos selecionados para o estudo, obedeceram o critério estabelecido:

- 1 Ocorrência de *dropouts*;
- 2 Decaimento do fluxo eletrônico em duas ordens de grandeza, nas CME, e em uma ordem de grandeza, nas HSS;
- 3 Variação na velocidade solar:
 - **CME**: ocorre de maneira abrupta no incremento, e decai rapidamente ou mantém sua intensidade;
 - **HSS**: ocorre repentinamente no incremento e decai gradativamente;
- 4 Intensa flutuação em B_z com orientação preferencial sul (valores negativos);
- 5 Compressão da magnetopausa.

O principal interesse aqui é identificar as relações diretas entre estruturas de origem solar e o fluxo de partículas relativísticas no cinturão de radiação externo. Portanto, cada evento é analisado separadamente, e os processos dinâmicos relacionados ao impacto da estrutura solar no cinturão externo são discutidos.

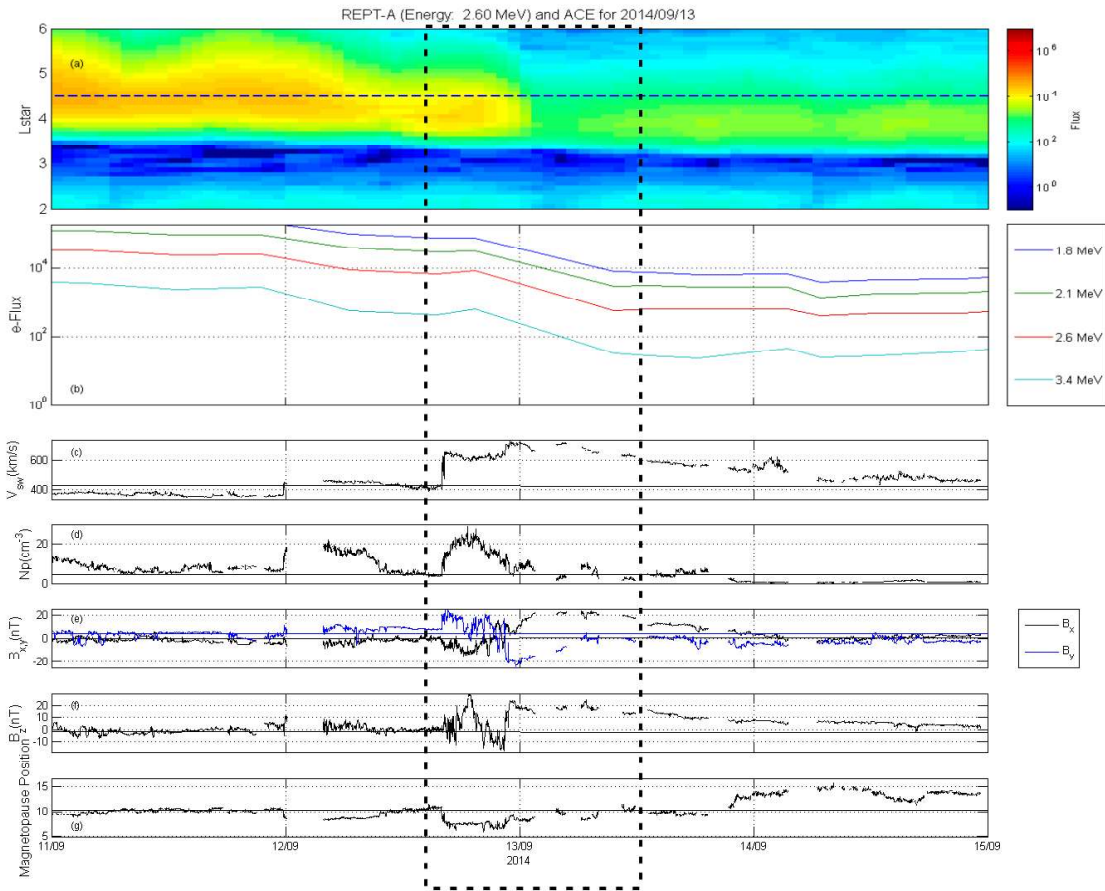
Todas as figuras apresentam, de cima para baixo, o fluxo de elétrons no nível de 2.6 MeV em função de L^* (eixo vertical) e do tempo (eixo horizontal); o fluxo de elétrons nos níveis de 1.8 MeV, 2.10 MeV, 2.6 MeV e 3.4 MeV para o L^* destacado, correspondente ao eixo horizontal pontilhado do primeiro painel; a velocidade do vento solar (V_{SW}); a densidade da estrutura solar (N_p); as componentes B_x , B_y e B_z do campo magnético do meio interplanetário (IMF); e a altura da magnetopausa estimada a partir do modelo de (SHUE; SONG et al., 1998).

5.1 Eventos de *Coronal Mass Ejection*

5.1.1 Evento: 13/09/2014

Dentre os eventos catalogados como *Coronal Mass Ejection*, este é o mais complexo. Na figura 10, observa-se que o fluxo de elétrons no nível de 2.6 MeV diminui sutilmente nas primeiras horas do dia 12/09/2014 e, ao final do dia, apresenta um decaimento levemente mais considerável, em aproximadamente uma ordem de grandeza, decaindo seu total de $\sim 10^4$ para $\sim 10^3$. O *dropout* observado ocorre em níveis de L^* a partir de 4.0Re e persiste durante todo o período analisado. Observa-se ainda que o *dropout* ocorre em vários níveis de energia no cinturão externo, 1.8 MeV, 2.1 MeV, 2.6 MeV e 3.4 MeV, com as mesmas características de decaimento em todos os níveis.

Figura 10 – (a) Fluxo de elétrons no nível de 2.6 MeV em função de L^* (eixo vertical) e do tempo (eixo horizontal); (b) Fluxo de elétrons nos níveis de 1.8 MeV, 2.1 MeV, 2.6 MeV e 3.4 MeV para $L^* = 4.5$, correspondente ao eixo horizontal pontilhado do primeiro painel; (c) Velocidade do vento solar (V_{SW}); (d) Densidade da estrutura solar (N_p); (e) Componentes B_x e B_y do IMF; (f) Componente B_z do IMF; (g) Compressão da magnetopausa calculada a partir do modelo de (SHUE; SONG et al., 1998). Os fluxos de elétrons são obtidos a partir dos dados do instrumento REPT a bordo das sondas de Van Allen. Os dados V_{SW} , B_x , B_y , B_z e a compressão da magnetopausa são obtidos a partir de instrumentos instalados no satélite ACE em órbita no ponto Lagrangeano L1.



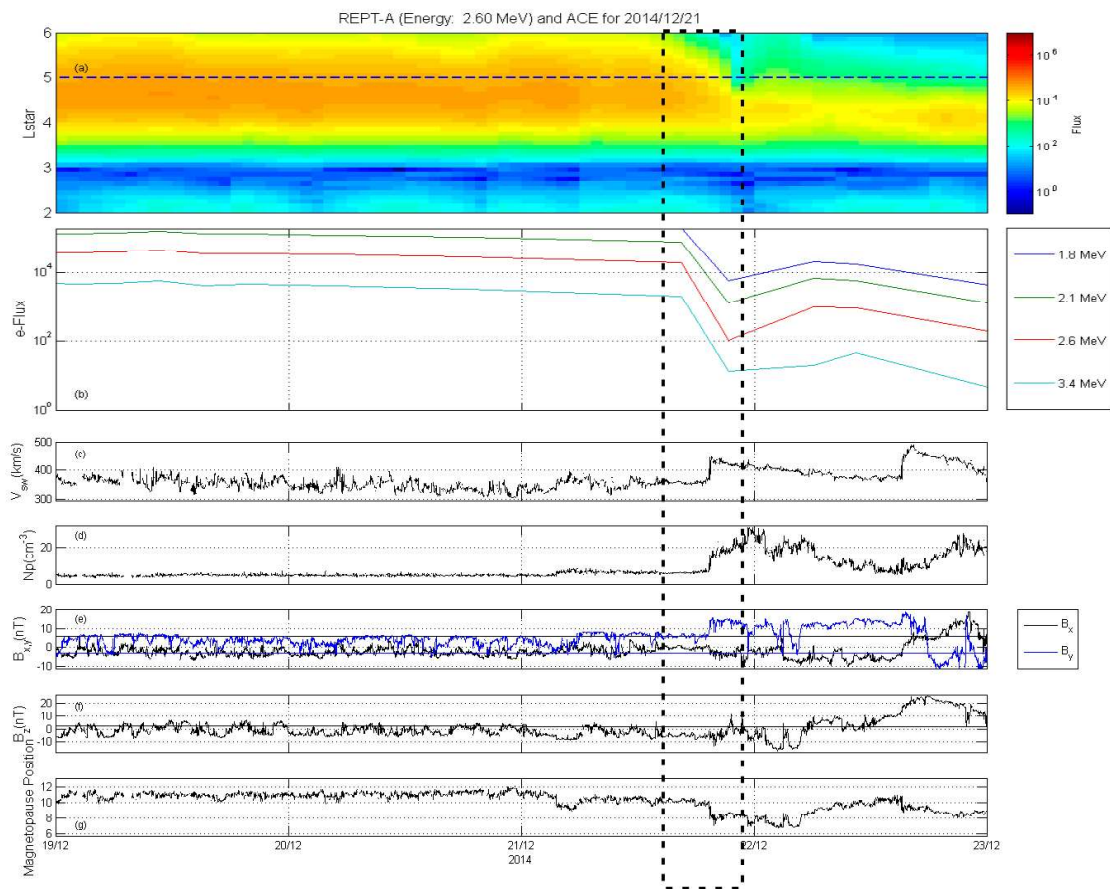
Fonte: o Autor.

No entanto, sabendo-se que o evento selecionado refere-se a período de ocorrência de CME, espera-se que o comportamento do vento solar, após sua velocidade aumentar abruptamente, seja de um decaimento rápido ou de um mantimento de intensidade, o que não ocorre. É observado um decaimento gradativo da mesma. Este comportamento da velocidade do vento solar ocorre simultaneamente com algumas respostas na intensidade do IMF incomuns, considerando eventos originados de CMEs isoladas. Destaca-se, além do comportamento da velocidade solar, a ocorrência de apenas uma troca de setor entre B_x e B_y ; B_z , após um período extremamente curto de orientação preferencial sul, orientação preferencial exclusivamente norte, impossibilitando a ocorrência de reconexão na parte frontal da magnetosfera. A altura da magnetopausa atinge $\sim 7R_E$ por um curto período de tempo, voltando a valores padrões logo após o decaimento. Isto

implica dizer que há indícios de que outras estruturas solares estão associadas a esse evento, estruturas das quais impossibilitam um maior decaimento do fluxo e causam um retardamento da diminuição da velocidade do vento solar. Mesmo com tais características que não fazem parte do padrão de um evento de CME, conforme o catalogado por Richardson (RICHARDSON; CANE, 2017), a estrutura principal do evento é uma *Coronal Mass Ejection*, portanto o evento é catalogado como CME.

5.1.2 Evento: 21/12/2014

Figura 11 – (a) Fluxo de elétrons no nível de 2.6 MeV em função de L^* (eixo vertical) e do tempo (eixo horizontal); (b) Fluxo de elétrons nos níveis de 1.8 MeV, 2.1 MeV, 2.6 MeV e 3.4 MeV para $L^* = 5.0$, correspondente ao eixo horizontal pontilhado do primeiro painel; (c) Velocidade do vento solar (V_{SW}); (d) Densidade da estrutura solar (N_p); (e) Componentes B_x e B_y do IMF; (f) Componente B_z do IMF; (g) Compressão da magnetopausa calculada a partir do modelo de (SHUE; SONG et al., 1998). Os fluxos de elétrons são obtidos a partir dos dados do instrumento REPT a bordo das sondas de Van Allen. Os dados V_{SW} , B_x , B_y , B_z e a compressão da magnetopausa são obtidos a partir de instrumentos instalados no satélite ACE em órbita no ponto Lagrangeano L1.



Fonte: o Autor.

Na figura 11, observa-se que o fluxo de elétrons no nível de 2.6 MeV diminui significativamente, aproximadamente duas ordens de grandeza, nas últimas horas do dia 21/12/2014.

O *dropout* observado ocorre em níveis de L^* a partir de 4.0Re e persiste durante o restante do período analisado. Observa-se ainda que o *dropout* ocorre em vários níveis de energia no cinturão externo, 1.8 MeV, 2.1 MeV, 2.6 MeV e 3.4 MeV. No entanto, sabendo-se que o evento selecionado refere-se a período de ocorrência de CME, é importante destacar o comportamento do vento solar no instante inicial do *dropout*. Ocorrem intensas flutuações no período que antecede o evento e um abrupto aumento na velocidade no momento destacado. Como este comportamento da velocidade do vento solar ocorre simultaneamente com um campo magnético do IMF, é importante destacar: um aumento da densidade N_p do vento solar; B_z , com orientação preferencial negativa, com pequenas trocas de setor, ou seja, mudança de orientação em conjunto, das componentes B_x e B_y ; e uma leve compressão da magnetopausa, é possível concluir que outras estruturas solares estão associadas com a CME apresentada, pois o *Magnetopause Shadowing* não atinge a camada externa do cinturão externo de Van Allen.

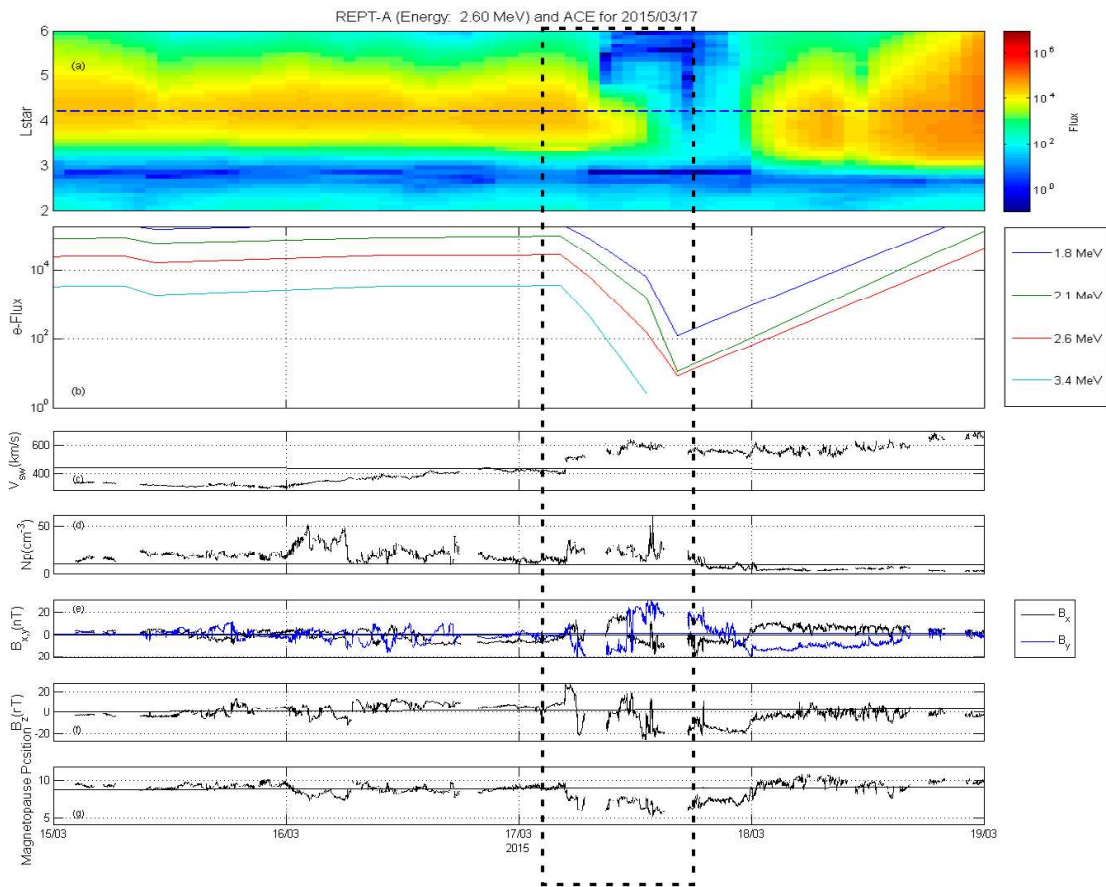
5.1.3 Evento: 17/03/2015

Na figura 12, observa-se que o fluxo de elétrons no nível de 2.6 MeV diminui consideravelmente durante o dia 17/03/2015, decaindo seu total de $\sim 10^4$ para $\sim 10^1$. O *dropout* observado ocorre em níveis de L^* a partir de 3.5Re e persiste durante um breve período. Observa-se ainda que o *dropout* ocorre em vários níveis de energia no cinturão externo, 1.8 MeV, 2.1 MeV, 2.6 MeV e 3.4 MeV, ocorrendo em duas fases nos dois primeiros níveis. No entanto, sabendo-se que o evento selecionado refere-se a período de ocorrência de CME, é importante destacar o comportamento do vento solar no instante inicial do *dropout*, em que a velocidade do vento solar já havia aumentado gradativamente antes do evento e, no início do evento, aumenta abruptamente de valores próximos a 400km/s para aproximadamente 600 km/s, persistindo sua intensidade durante o restante do período. Este comportamento da velocidade do vento solar ocorre simultaneamente com o abruptas respostas na intensidade do IMF. Destacando: picos de grande densidade N_p ; ocorrência de várias trocas de setores entre B_x e B_y ; e B_z com pico negativo, -20nT, e posterior orientação preferencial sul, o que seria um indicativo de ocorrência de reconexão na parte frontal da magnetosfera. A altura da magnetopausa atinge $\sim 5Re$, isso implica dizer que a magnetopausa comprimiu até atingir a parte interna do cinturão externo de Van Allen, ocorrendo o *magnetopause shadowing*.

5.1.4 Evento: 22/06/2015

Na figura 13, observa-se que o fluxo de elétrons no nível de 2.6 MeV diminui em três fases durante o dia 22/06/2015, em aproximadamente quatro ordens de grandeza, decaindo seu total de $\sim 10^5$ para $\sim 10^1$. O *dropout* observado ocorre em níveis de L^* a partir de 4.0Re e persiste durante a noite do dia 22 para o dia 23. Observa-se também que o *dropout* ocorre em vários níveis de energia no cinturão externo, 1.8 MeV, 2.1 MeV, 2.6 MeV e 3.4 MeV. No entanto, sabendo-se que o evento selecionado refere-se a período de ocorrência de CME, é importante destacar o comportamento do vento solar, em que a velocidade do vento solar possui três incrementos que se mantém, aumentando de aproximadamente 300km/s para aproximadamente 700 km/s, com seu maior aumento ocorrendo em conjunto, conforme o esperado, com o maior decaimento do fluxo eletrônico. Este comportamento da velocidade do vento solar ocorre simultaneamente

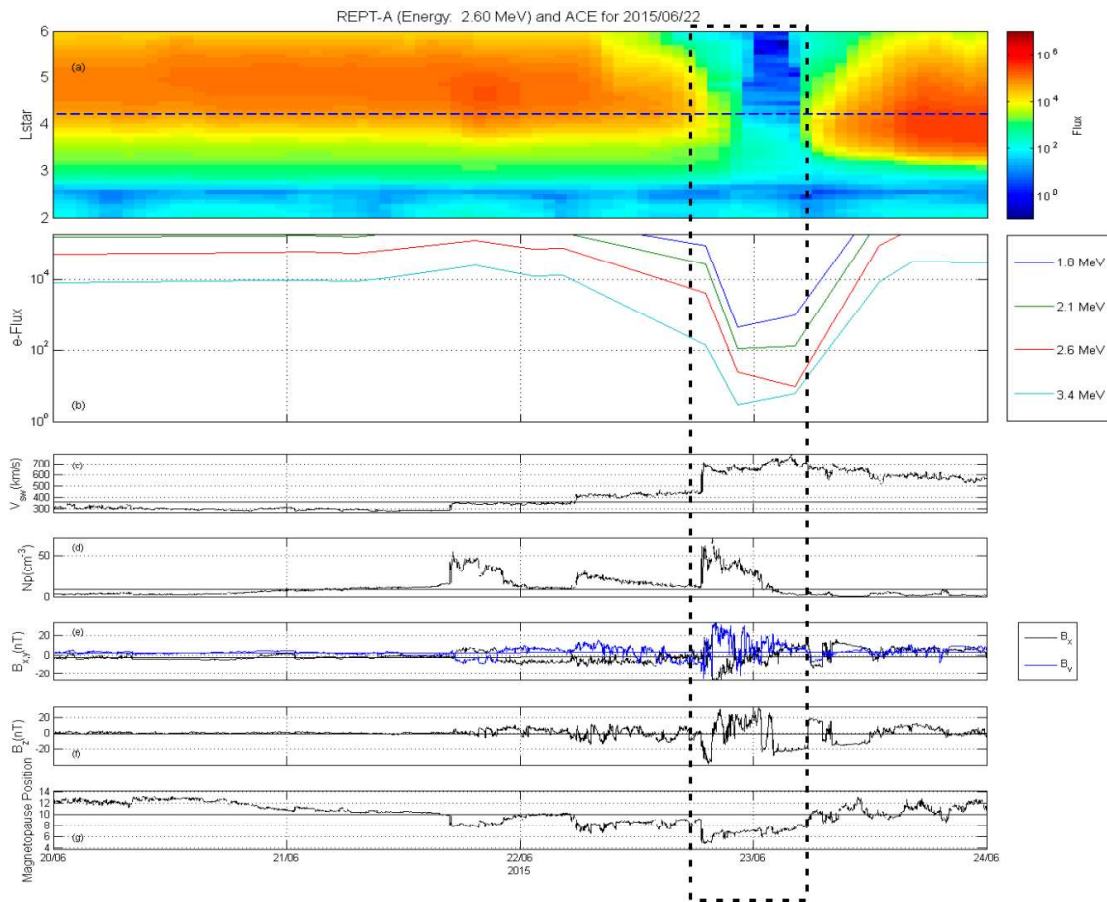
Figura 12 – (a) Fluxo de elétrons no nível de 2.6 MeV em função de L^* (eixo vertical) e do tempo (eixo horizontal); (b) Fluxo de elétrons nos níveis de 1.8 MeV, 2.1 MeV, 2.6 MeV e 3.4 MeV para $L^* = 4.1$, correspondente ao eixo horizontal pontilhado do primeiro painel; (c) Velocidade do vento solar (V_{SW}); (d) Densidade da estrutura solar (N_p); (e) Componentes B_x e B_y do IMF; (f) Componente B_z do IMF; (g) Compressão da magnetopausa calculada a partir do modelo de (SHUE; SONG et al., 1998). Os fluxos de elétrons são obtidos a partir dos dados do instrumento REPT a bordo das sondas de Van Allen. Os dados V_{SW} , B_x , B_y , B_z e a compressão da magnetopausa são obtidos a partir de instrumentos instalados no satélite ACE em órbita no ponto Lagrangeano L1.



Fonte: o Autor.

com o abruptas respostas na intensidade do IMF. Destacam-se três picos de intensidade da densidade N_p , algumas trocas de setores entre B_x e B_y , B_z com flutuações que aumentam de intensidade durante o período e com um pico negativo de -20nT no início do evento, o que seria um indicativo de ocorrência de reconexão na parte frontal da magnetosfera. A altura da magnetopausa atinge $\sim 5R_e$, no momento do dropout. Isto implica dizer que a magnetopausa comprimiu até atingir o cinturão externo de Van Allen, portanto a perda de partículas está associada com o *Shadowing* apresentado. Todos os dados do IMF possuem alta conturbação durante o período mais significativo do evento (destacado dentro das linhas pontilhadas da imagem 13).

Figura 13 – (a) Fluxo de elétrons no nível de 2.6 MeV em função de L^* (eixo vertical) e do tempo (eixo horizontal); (b) Fluxo de elétrons nos níveis de 1.8 MeV, 2.1 MeV, 2.6 MeV e 3.4 MeV para $L^* = 4.1$, correspondente ao eixo horizontal pontilhado do primeiro painel; (c) Velocidade do vento solar (V_{SW}); (d) Densidade da estrutura solar (N_p); (e) Componentes B_x e B_y do IMF; (f) Componente B_z do IMF; (g) Compressão da magnetopausa calculada a partir do modelo de (SHUE; SONG et al., 1998). Os fluxos de elétrons são obtidos a partir dos dados do instrumento REPT a bordo das sondas de Van Allen. Os dados V_{SW} , B_x , B_y , B_z e a compressão da magnetopausa são obtidos a partir de instrumentos instalados no satélite ACE em órbita no ponto Lagrangeano L1.



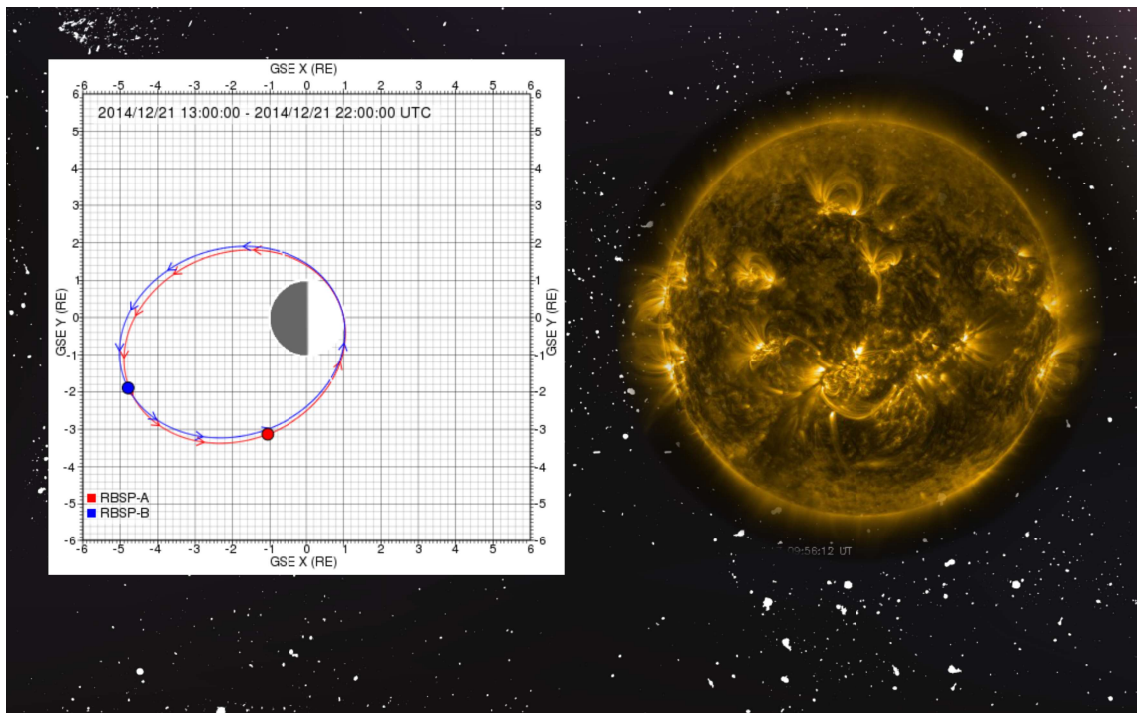
Fonte: o Autor.

5.1.5 Posição das Van Allen Probes e Imagem da Superfície Solar

As imagens abaixo (14, 15, 16, 17) apresentam a posição das Van Allen Probes A e B (a esquerda) no momento da detecção do evento e a captura da imagem solar (a direita) no momento estimado de origem da estrutura solar.

É importante destacar que em todas as imagens solar há ocorrência de vários pontos de erupções na superfície coronal. É dessas regiões que se originam as *Coronal Mass Ejections* estudadas. Quando essas erupções acontecem em quantidade ou intensidade suficiente, elas podem gerar um gradiente no campo magnético interplanetário por onde a estrutura solar se desloca e atinge a magnetosfera terrestre, podendo causar alterações na dinâmica de partículas em torno

Figura 14 – Posição das probes A e B (a esquerda), na data do evento detectado e captura da superfície solar em 09/09/2014 às 19:11:12 UT.



Fonte: SDO.

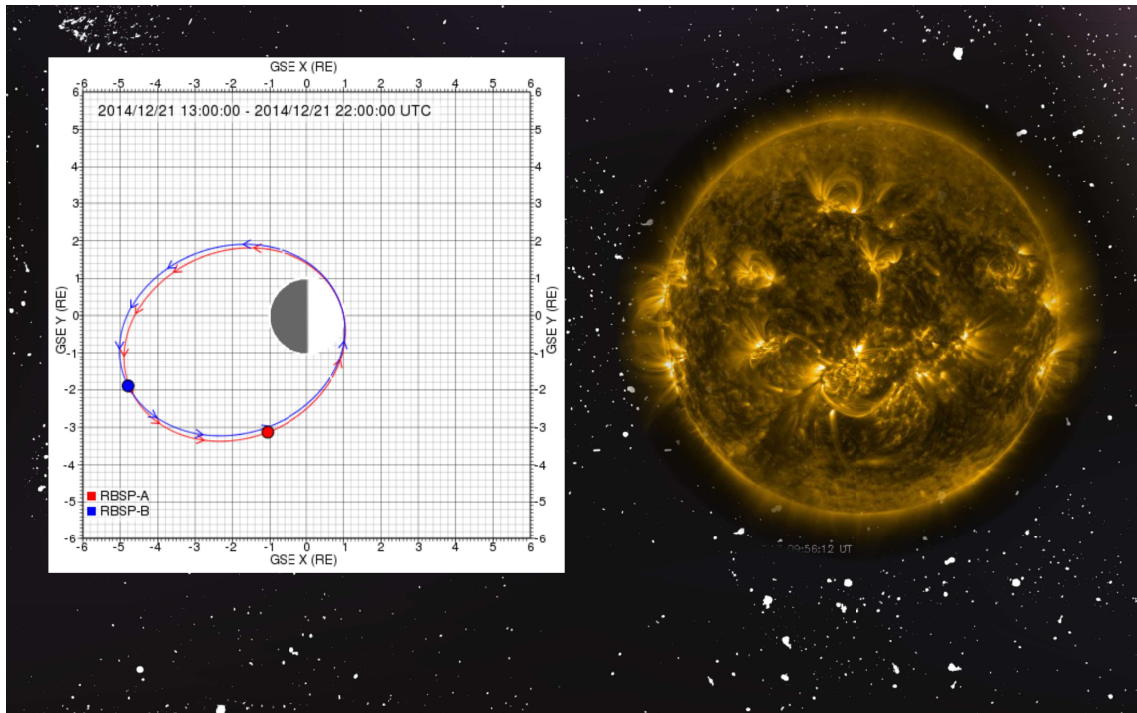
do globo.

5.2 Eventos de *High Speed Stream*

5.2.1 Evento: 08/02/2014

Na figura 18, observa-se que o fluxo de elétrons no nível de 2.6 MeV diminui sutilmente durante o dia 08/02/2014, decaindo seu total de $\sim 10^2$ para $\sim 10^1$. O *dropout* observado ocorre em níveis de L^* a partir de 5.0Re e persiste somente durante o dia analisado. Observa-se ainda que o *dropout* ocorre em vários níveis de energia no cinturão externo, 1.8 MeV, 2.1 MeV, 2.6 MeV e 3.4 MeV, todos em mesma escala. No entanto, sabendo-se que o evento selecionado refere-se a período de ocorrência de HSS, é importante destacar o comportamento do vento solar no instante inicial do *dropout*, em que a velocidade do vento solar aumenta de 400km/s para aproximadamente 450 km/s, decaindo gradativamente durante o restante do período. Este comportamento da velocidade do vento solar ocorre simultaneamente com o respostas na intensidade do IMF. Destacando: pico de grande densidade N_p no momento do evento; ocorrência de várias trocas de setores entre B_x e B_y ; e B_z com intensa flutuação e orientação preferencial sul, o que seria um indicativo de ocorrência de reconexão na parte frontal da magnetosfera. A altura da magnetopausa atinge $\sim 7Re$, isso implica dizer que a magnetopausa comprimiu até atingir a parte externa do cinturão externo de Van Allen, ocorrendo um leve *magnetopause shadowing*, o que gera indícios de que a perda de partículas pode ter sido causada por uma HSS associada com outras estruturas, como

Figura 15 – Posição das probes A e B (a esquerda), na data do evento detectado e captura da superfície solar em 17/12/2014 às 09:56:12 UT.



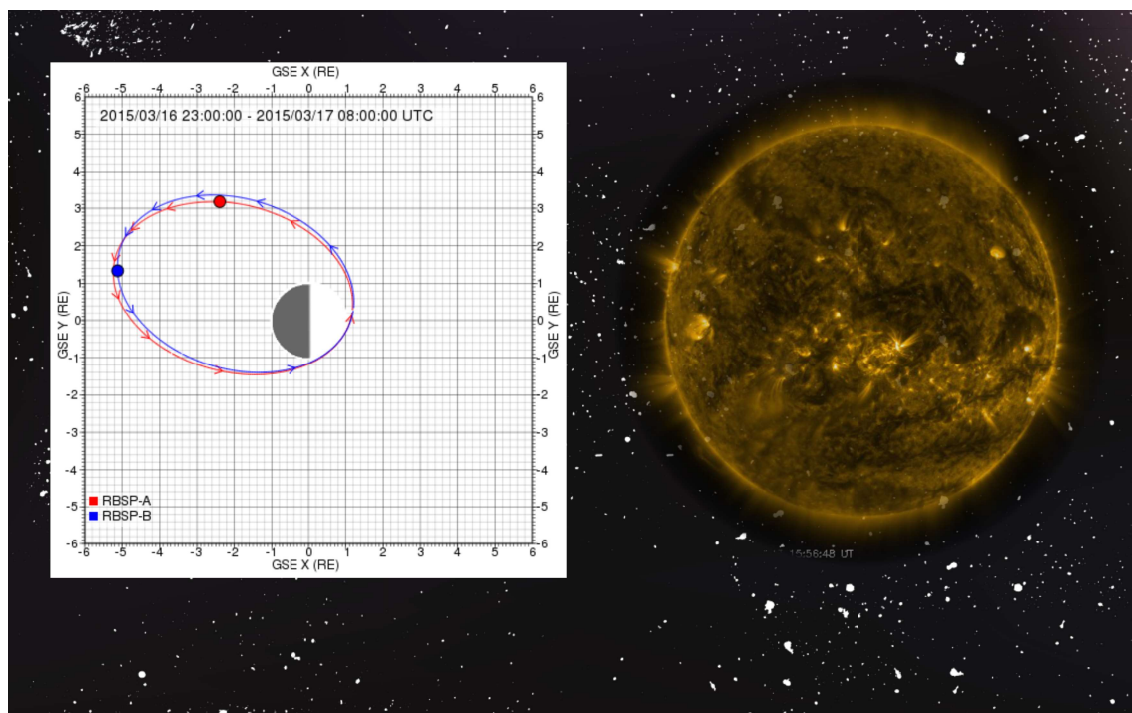
Fonte: SDO.

ondas de baixa frequência e consequente processo de difusão radial.

5.2.2 Evento: 13/03/2014

Na figura 19, observa-se que o fluxo de elétrons no nível de 2.6 MeV diminui sutilmente entre os dias 12/03/2014 e 13/03/2014, decaindo seu total de $\sim 10^2$ para $\sim 10^1$. O *dropout* observado ocorre em níveis de L^* a partir de $\sim 5.2R_e$ e persiste somente durante o período destacado. Observa-se ainda que o *dropout* ocorre em vários níveis de energia no cinturão externo, 1.8 MeV, 2.1 MeV e 2.6 MeV, todos em mesma escala. No entanto, sabendo-se que o evento selecionado refere-se a período de ocorrência de HSS, é importante destacar o comportamento do vento solar no instante inicial do *dropout*, em que a velocidade do vento solar aumenta e diminui de maneira gradativa, de $\sim 300\text{km/s}$ para aproximadamente 600 km/s , decaindo gradativamente após o início do dia 14/03/2014. Este comportamento ocorre simultaneamente com o respostas na intensidade do IMF. Destaca-se o pico de grande densidade N_p no momento do evento; ocorrência de duas trocas de setores entre B_x e B_y juntas ao decaimento; e B_z com orientação preferencial sul durante o evento e intensa flutuação logo após, o que seria um indicativo de ocorrência de reconexão na parte frontal da magnetosfera. A altura da magnetopausa atinge $\sim 8R_e$, isso implica dizer que a magnetopausa comprimiu até atingir a parte externa do cinturão externo de Van Allen, ocorrendo um leve *magnetopause shadowing*, o que gera indícios de que a perda de partículas pode ter sido causada por uma HSS associada com outras estruturas, como ondas de baixa frequência e consequente processo de difusão radial.

Figura 16 – Posição das probes A e B (a esquerda), na data do evento detectado e captura da superfície solar em 13/03/2015 às 15:56:48 UT.

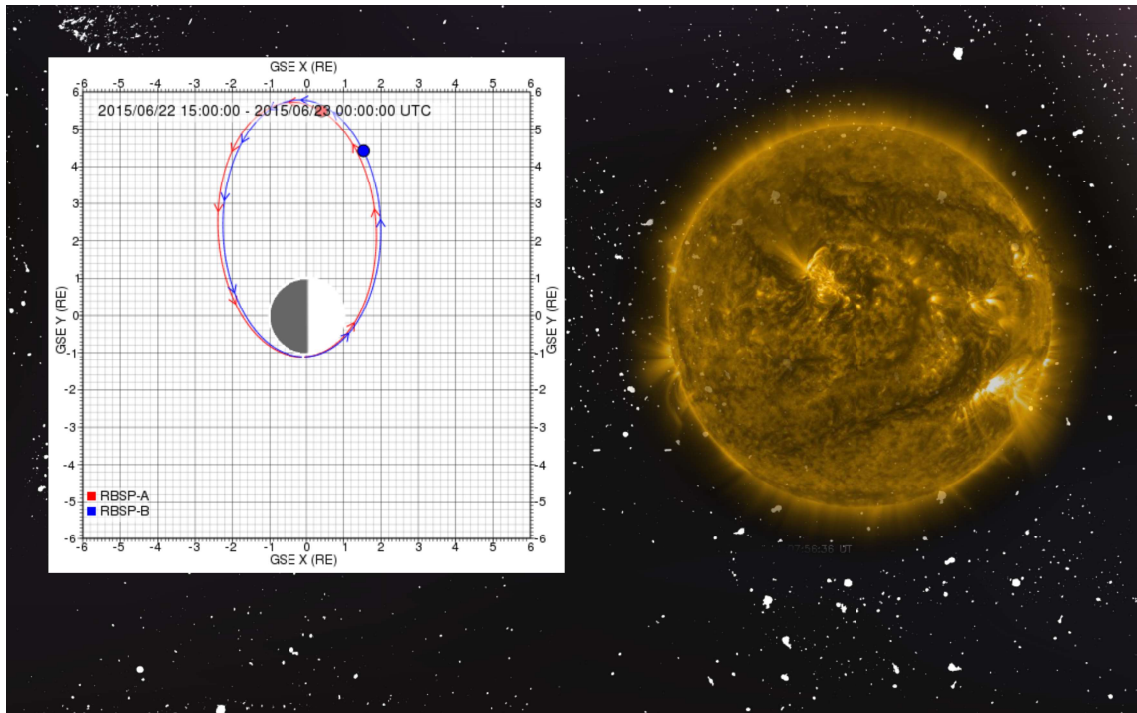


Fonte: SDO.

5.2.3 Evento: 17/02/2015

Na figura 20, observa-se que o fluxo de elétrons no nível de 2.6 MeV diminui sutilmente durante o dia 17/02/2015, decaindo seu total de $\sim 10^4$ para $\sim 10^3$. O *dropout* observado ocorre em níveis de L^* a partir de 4.0Re e persiste durante todo o período. Observa-se ainda que o *dropout* ocorre em vários níveis de energia no cinturão externo, 1.8 MeV, 2.1 MeV, 2.6 MeV e 3.4 MeV, todos em mesma escala. No entanto, sabendo-se que o evento selecionado refere-se a período de ocorrência de HSS, é importante destacar o comportamento do vento solar durante todo o período apresentado, em que a velocidade do vento solar aumenta de maneira gradativa, de ~ 300 km/s para ~ 450 km/s. Este comportamento ocorre simultaneamente com o respostas na intensidade do IMF. Destaca-se uma flutuação gradual com breve pico de densidade N_p prévio ao evento; ocorrência de várias trocas de setores entre B_x e B_y durante todo o período; e B_z com orientação preferencial sul e intensa flutuação durante o evento, o que seria um indicativo de ocorrência de reconexão na parte frontal da magnetosfera. A altura da magnetopausa permanece variando entre $\sim 8Re$ e $\sim 10Re$, isso implica dizer que a magnetopausa quase não atingiu o cinturão externo de Van Allen em seu *magnetopause shadowing*, o que gera indícios de que a perda de partículas deve ter sido causada por uma HSS associada com outras estruturas, como ondas de baixa frequência e consequente processo de difusão radial.

Figura 17 – Posição das probes A e B (a esquerda), na data do evento detectado e captura da superfície solar em 21/06/2015 às 07:56:36 UT.



Fonte: SDO.

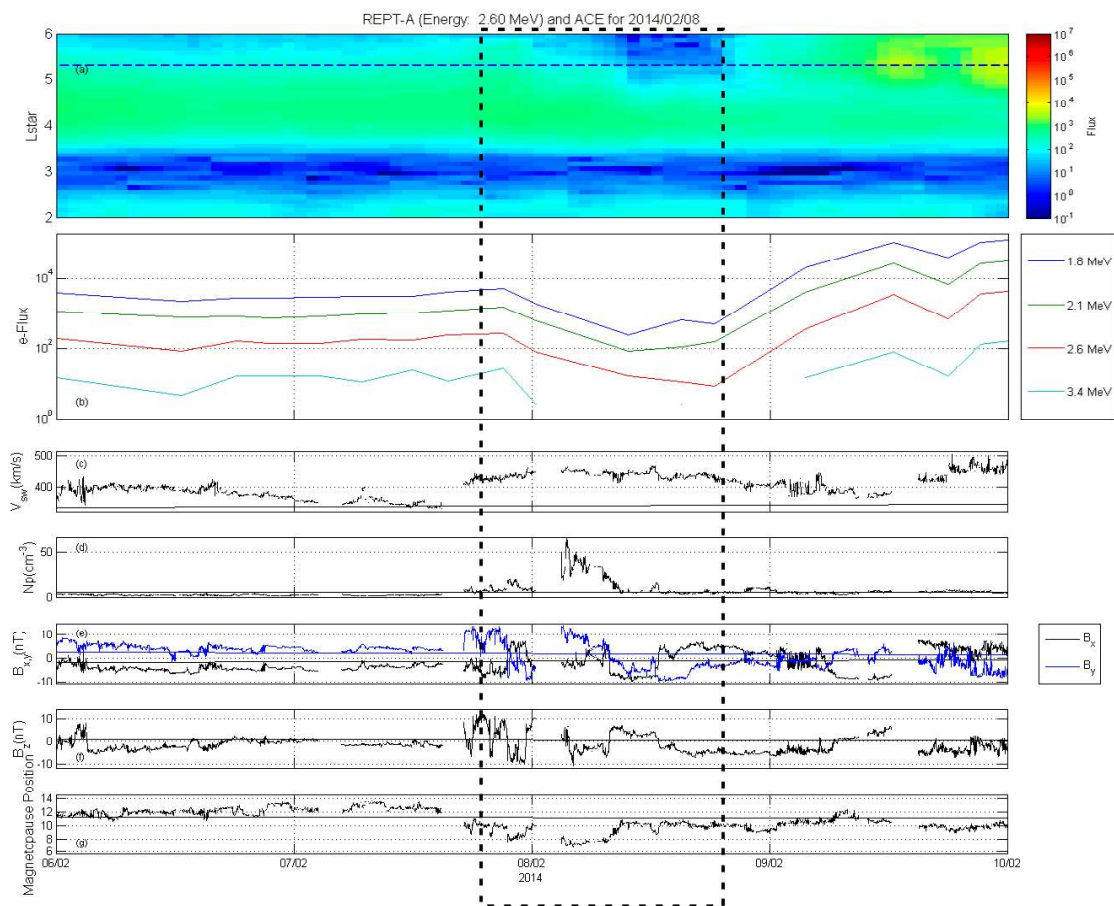
5.2.4 Evento: 23/02/2015

Na figura 21, observa-se que o fluxo de elétrons no nível de 2.6 MeV diminui sutilmente durante o dia 23/02/2015, decaindo seu total de $\sim 10^3$ para $\sim 10^2$. O *dropout* observado ocorre em níveis de L^* a partir de $5.0R_e$ e persiste durante o fim do período. Observa-se ainda que o *dropout* ocorre em vários níveis de energia no cinturão externo, 1.8 MeV, 2.1 MeV e 2.6 MeV, todos em mesma escala. No entanto, sabendo-se que o evento selecionado refere-se a período de ocorrência de HSS, é importante destacar o comportamento do vento solar durante todo o período apresentado, em que a velocidade do vento solar aumenta de maneira gradativa, de ~ 300 km/s para ~ 500 km/s. Este comportamento ocorre simultaneamente com o respostas na intensidade do IMF. Destaca-se um aumento gradual durante o período apresentado e picos de densidade N_p no momento do evento; ocorrência de várias trocas de setores entre B_x e B_y durante o *dropout*; e B_z com orientação preferencial sul e intensa flutuação, o que seria um indicativo de ocorrência de reconexão na parte frontal da magnetosfera. A altura da magnetopausa permanece variando entre $\sim 7R_e$, isso implica dizer que a magnetopausa atingiu a superfície externa do cinturão externo de Van Allen em seu *magnetopause shadowing*, indicando que essa foi a causa da leve perda de partículas na dinâmica do cinturão.

5.2.5 Posição das Van Allen Probes e Imagem da Superfície Solar

As imagens abaixo (22, 23, 24, 25) apresentam a posição das Van Allen Probes A e B (a esquerda) no momento da detecção do evento e a captura da imagem solar (a direita) no

Figura 18 – (a) Fluxo de elétrons no nível de 2.6 MeV em função de L^* (eixo vertical) e do tempo (eixo horizontal); (b) Fluxo de elétrons nos níveis de 1.8 MeV, 2.1 MeV, 2.6 MeV e 3.4 MeV para $L^* = 5.2$, correspondente ao eixo horizontal pontilhado do primeiro painel; (c) Velocidade do vento solar (V_{SW}); (d) Densidade da estrutura solar (N_p); (e) Componentes B_x e B_y do IMF; (f) Componente B_z do IMF; (g) Compressão da magnetopausa calculada a partir do modelo de (SHUE; SONG et al., 1998). Os fluxos de elétrons são obtidos a partir dos dados do instrumento REPT a bordo das sondas de Van Allen. Os dados V_{SW} , B_x , B_y , B_z e a compressão da magnetopausa são obtidos a partir de instrumentos instalados no satélite ACE em órbita no ponto Lagrangeano L1.

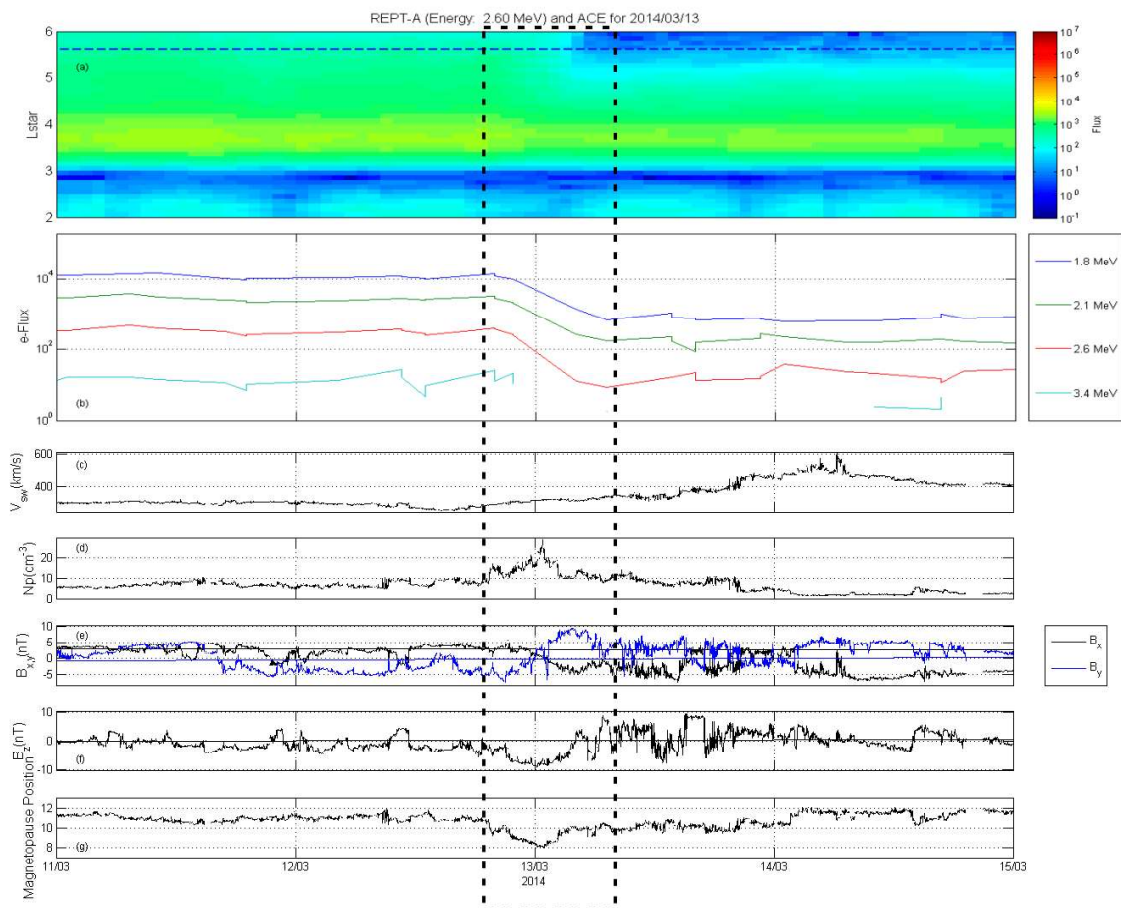


Fonte: o Autor.

momento estimado de origem da estrutura solar.

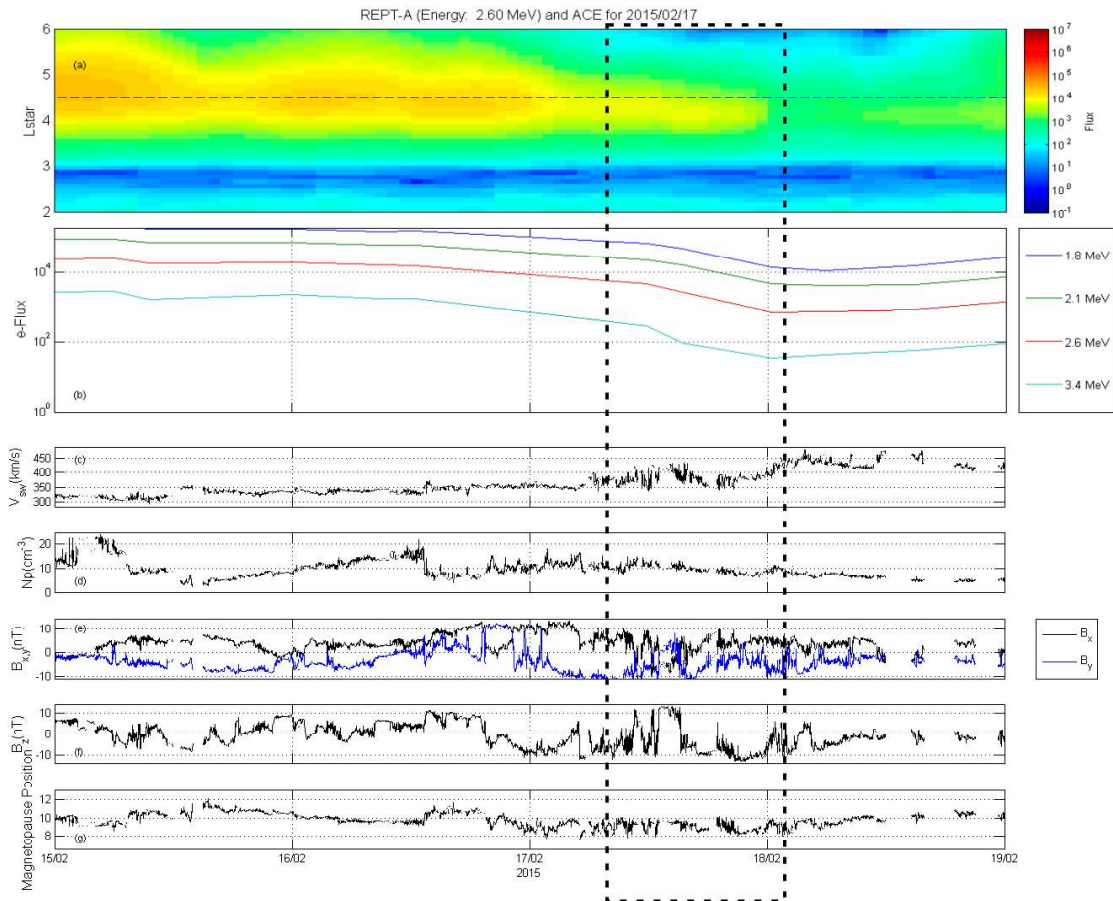
É importante destacar que em todas as imagens solar há ocorrência de várias manchas escuras na superfície coronal, que são os buracos coronais, regiões mais frias da superfície solar. É dessas regiões que se originam as *High Speed Stram* estudadas. Essas erupções podem gerar um aumento na velocidade do vento solar em direção ao globo terrestre por onde a estrutura se desloca e atinge a magnetosfera terrestre, podendo causar alterações na dinâmica de partículas nos cinturões interno e externo.

Figura 19 – (a) Fluxo de elétrons no nível de 2.6 MeV em função de L^* (eixo vertical) e do tempo (eixo horizontal); (b) Fluxo de elétrons nos níveis de 1.8 MeV, 2.1 MeV, 2.6 MeV e 3.4 MeV para $L^* = 5.7$, correspondente ao eixo horizontal pontilhado do primeiro painel; (c) Velocidade do vento solar (V_{SW}); (d) Densidade da estrutura solar (Np); (e) Componentes B_x e B_y do IMF; (f) Componente B_z do IMF; (g) Compressão da magnetopausa calculada a partir do modelo de (SHUE; SONG et al., 1998). Os fluxos de elétrons são obtidos a partir dos dados do instrumento REPT a bordo das sondas de Van Allen. Os dados V_{SW} , B_x , B_y , B_z e a compressão da magnetopausa são obtidos a partir de instrumentos instalados no satélite ACE em órbita no ponto Lagrangeano L1.



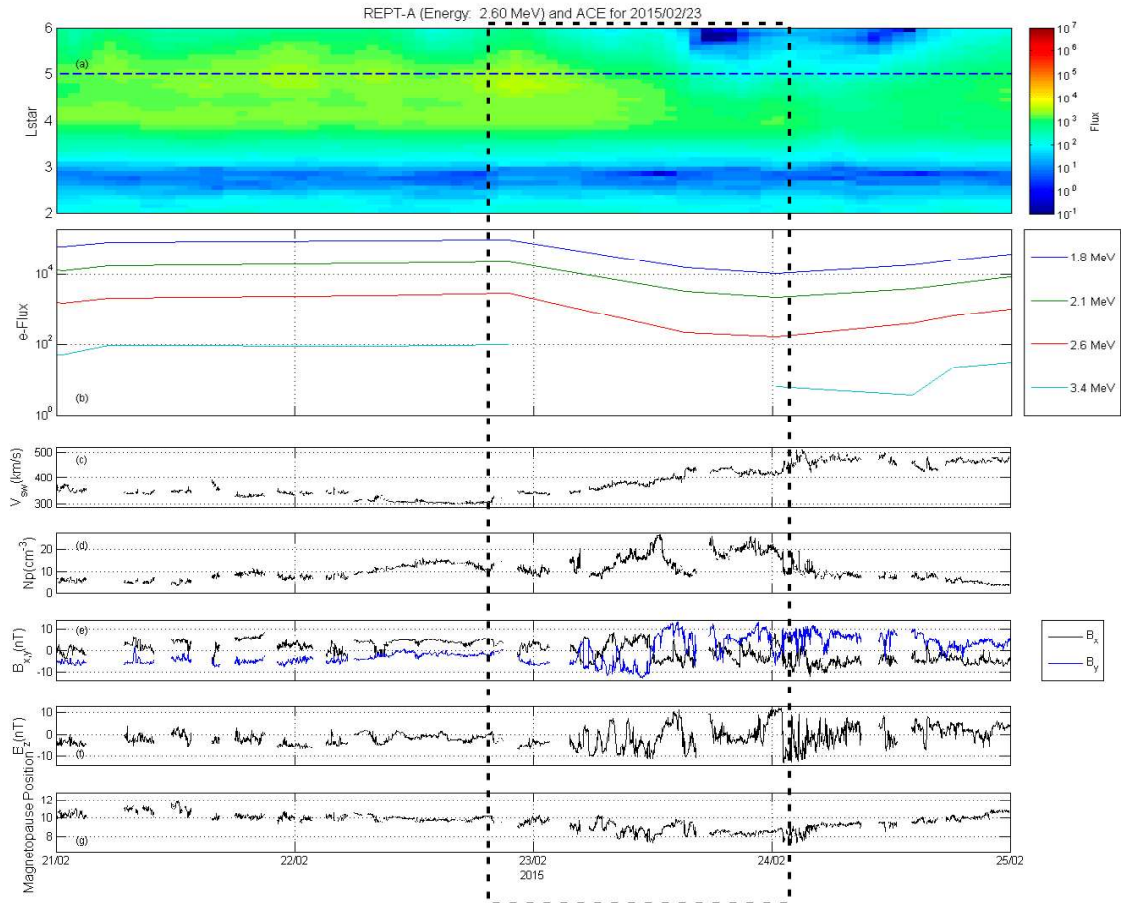
Fonte: o Autor.

Figura 20 – (a) Fluxo de elétrons no nível de 2.6 MeV em função de L^* (eixo vertical) e do tempo (eixo horizontal); (b) Fluxo de elétrons nos níveis de 1.8 MeV, 2.1 MeV, 2.6 MeV e 3.4 MeV para $L^* = 4.5$, correspondente ao eixo horizontal pontilhado do primeiro painel; (c) Velocidade do vento solar (V_{SW}); (d) Densidade da estrutura solar (N_p); (e) Componentes B_x e B_y do IMF; (f) Componente B_z do IMF; (g) Compressão da magnetopausa calculada a partir do modelo de (SHUE; SONG et al., 1998). Os fluxos de elétrons são obtidos a partir dos dados do instrumento REPT a bordo das sondas de Van Allen. Os dados V_{SW} , B_x , B_y , B_z e a compressão da magnetopausa são obtidos a partir de instrumentos instalados no satélite ACE em órbita no ponto Lagrangeano L1.



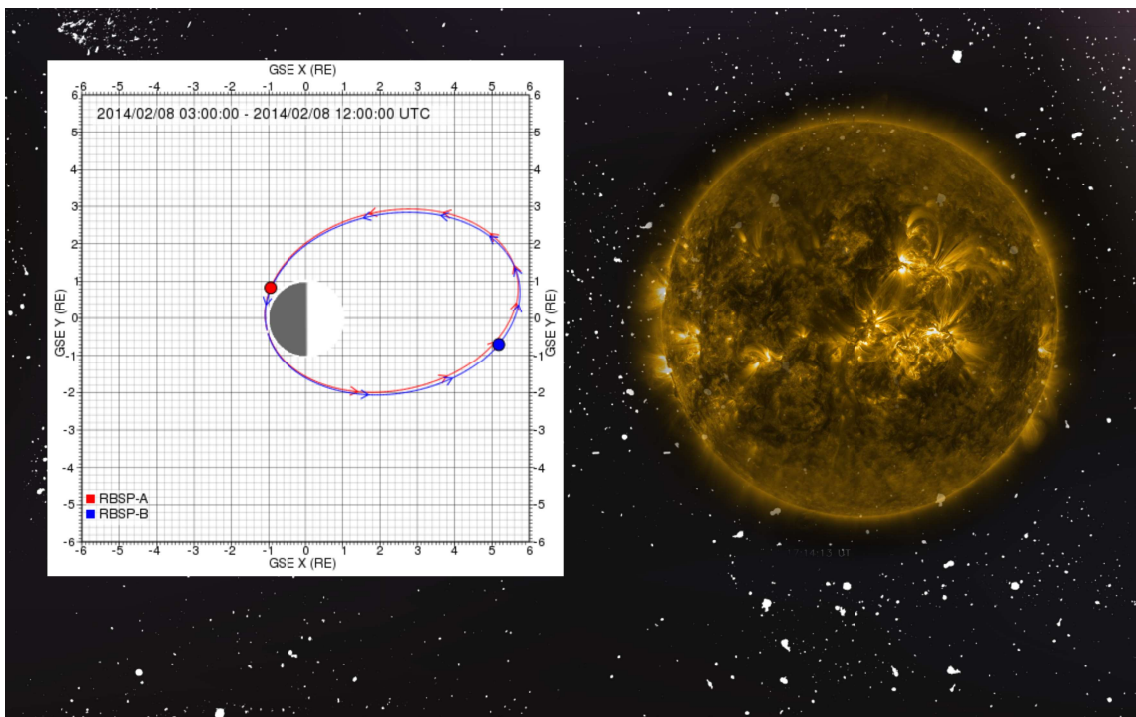
Fonte: o Autor.

Figura 21 – (a) Fluxo de elétrons no nível de 2.6 MeV em função de L^* (eixo vertical) e do tempo (eixo horizontal); (b) Fluxo de elétrons nos níveis de 1.8 MeV, 2.1 MeV, 2.6 MeV e 3.4 MeV para $L^* = 5.0$, correspondente ao eixo horizontal pontilhado do primeiro painel; (c) Velocidade do vento solar (V_{SW}); (d) Densidade da estrutura solar (N_p); (e) Componentes B_x e B_y do IMF; (f) Componente B_z do IMF; (g) Compressão da magnetopausa calculada a partir do modelo de (SHUE; SONG et al., 1998). Os fluxos de elétrons são obtidos a partir dos dados do instrumento REPT a bordo das sondas de Van Allen. Os dados V_{SW} , B_x , B_y , B_z e a compressão da magnetopausa são obtidos a partir de instrumentos instalados no satélite ACE em órbita no ponto Lagrangeano L1.



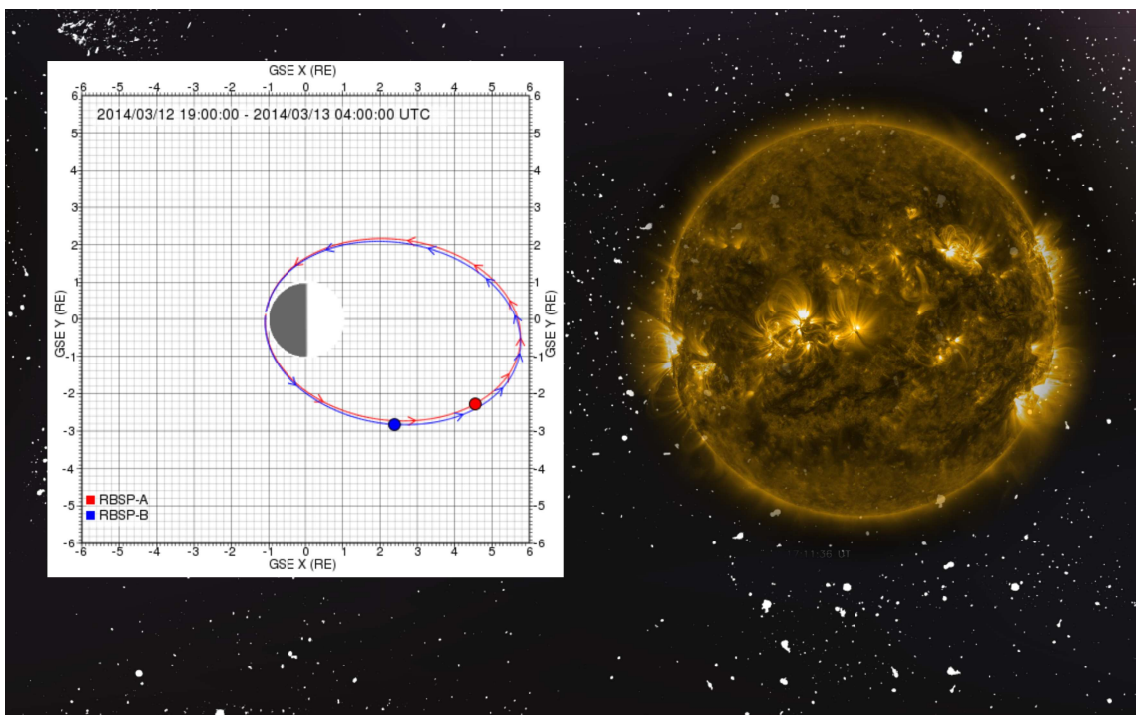
Fonte: o Autor.

Figura 22 – Posição das probes A e B (a esquerda), na data do evento detectado e captura da superfície solar em 04/02/2014 às 17:14:13 UT.



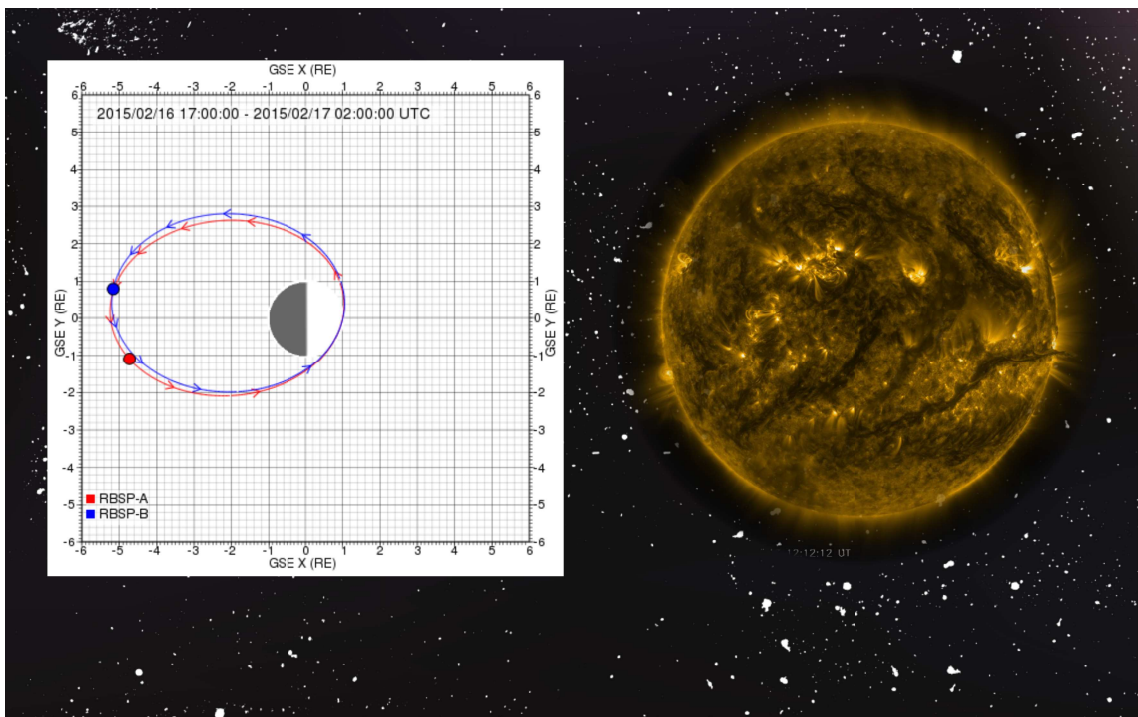
Fonte: SDO.

Figura 23 – Posição das probes A e B (a esquerda), na data do evento detectado e captura da superfície solar em 09/03/2014 às 17:11:36 UT.



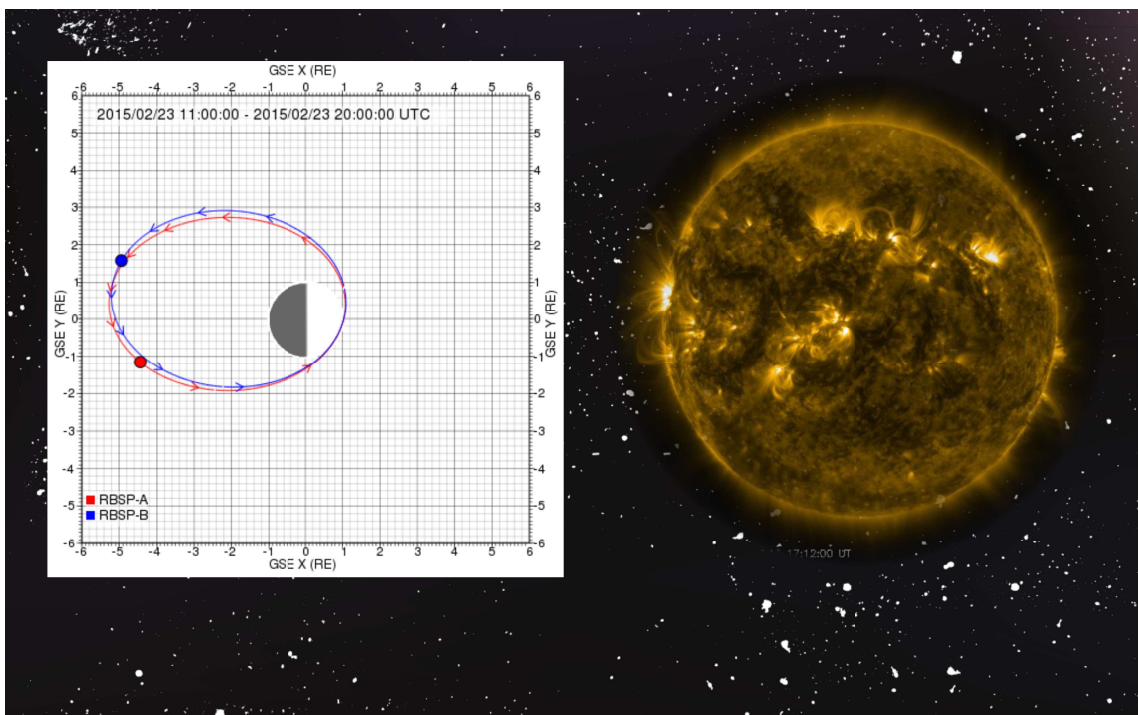
Fonte: SDO.

Figura 24 – Posição das probes A e B (a esquerda), na data do evento detectado e captura da superfície solar em 13/02/2015 às 12:12:12 UT.



Fonte: SDO.

Figura 25 – Posição das probes A e B (a esquerda), na data do evento detectado e captura da superfície solar em 23/06/2015 às 17:12:00 UT.



Fonte: SDO.

6 Conclusão

A partir dos dados analisados, ou seja, das quedas de ordem no fluxo de elétrons, as flutuações apresentadas no IMF e na compressão da magnetopausa, é possível verificar diversas características dos eventos de *Coronal Mass Ejections* e *High Speed Stream*, ambos causadores de *dropouts*.

Foi observado que, apesar da complexidade de alguns eventos, características das CMEs e das HSSs puderam ser observadas nos casos respectivamente catalogados, garantindo que suas fontes, (RICHARDSON; CANE, 2017) e a plataforma DONKI, estão corretas em seus catálogos.

As características que mais se destacam ao realizar a diferenciação dos dois tipos de evento são o fluxo eletrônico, que decai em torno de uma ordem de grandeza nos casos de *High Speed Stream* e em duas, ou mais, ordens de grandeza nas CMEs, e o comportamento do vento solar, que após seu incremento decai gradativamente nas HSSs, enquanto nas CMEs ele se mantém em elevada intensidade ou decai imediatamente após o pico de velocidade.

Bibliografia

- ALVES, L. R. et al. Outer radiation belt dropout dynamics following the arrival of two interplanetary coronal mass ejections. **Geophysical Research Letters**, American Geophysical Union (AGU), v. 43, n. 3, p. 978–987, fev. 2016. DOI: [10.1002/2015gl067066](https://doi.org/10.1002/2015gl067066).
- ARTEMYEV, A. V. et al. Storm-induced energization of radiation belt electrons: Effect of wave obliquity. **Geophysical Research Letters**, American Geophysical Union (AGU), v. 40, n. 16, p. 4138–4143, ago. 2013. DOI: [10.1002/grl.50837](https://doi.org/10.1002/grl.50837).
- BAKER, D. N. et al. 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**, Springer Nature, v. 179, n. 1-4, p. 337–381, dez. 2012. DOI: [10.1007/s11214-012-9950-9](https://doi.org/10.1007/s11214-012-9950-9).
- BAKER, D.N.; KANEKAL, S.G. Solar cycle changes, geomagnetic variations, and energetic particle properties in the inner magnetosphere. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, Elsevier BV, v. 70, n. 2-4, p. 195–206, fev. 2008. DOI: [10.1016/j.jastp.2007.08.031](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2007.08.031).
- BLAKE, J.B. et al. Identification of an unexpected space radiation hazard. **IEEE Transactions on Nuclear Science**, Institute of Electrical e Electronics Engineers (IEEE), v. 39, n. 6, p. 1761–1764, 1992. DOI: [10.1109/23.211364](https://doi.org/10.1109/23.211364).
- CHAMBAT, Frédéric; VALETTE, Bernard. Mean radius, mass, and inertia for reference Earth models. **Physics of the Earth and Planetary Interiors**, Elsevier BV, v. 124, n. 3-4, p. 237–253, ago. 2001. DOI: [10.1016/s0031-9201\(01\)00200-x](https://doi.org/10.1016/s0031-9201(01)00200-x).
- CHAPMAN, S.; FERRARO, V. C. A. A new theory of magnetic storms. **Journal of Geophysical Research**, American Geophysical Union (AGU), v. 36, n. 2, p. 77, 1931. DOI: [10.1029/te036i002p00077](https://doi.org/10.1029/te036i002p00077).
- DIAS, Wilton S.; PIASSI, Luis Paulo. Por Que A Variação Da Distância Terra-sol Não Explica As Estações Do Ano. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, SciELO Brasil, v. 29, n. 3, p. 325–329, 2007.
- FAIRFIELD, Donald H. Average and unusual locations of the Earth’s magnetopause and bow shock. **Journal of Geophysical Research**, American Geophysical Union (AGU), v. 76, n. 28, p. 6700–6716, out. 1971. DOI: [10.1029/ja076i028p06700](https://doi.org/10.1029/ja076i028p06700).
- HEIKKILA, Walter J. **Earth’s Magnetosphere: Formed by the Low-Latitude Boundary Layer**. [S.l.]: Elsevier, 2011.
- HUDSON, Mary K et al. Relationship of the Van Allen radiation belts to solar wind drivers. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, Elsevier, v. 70, n. 5, p. 708–729, 2008.

- KEIKA, K. et al. Outflow of energetic ions from the magnetosphere and its contribution to the decay of the storm time ring current. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, American Geophysical Union (AGU), v. 110, A9, set. 2005. DOI: [10.1029/2004ja010970](https://doi.org/10.1029/2004ja010970).
- KNOLL, Glenn F. Radiation detection and measurement. Wiley. New York. US, 1989.
- LIU, Ying et al. Geometric triangulation of imaging observations to track coronal mass ejections continuously out to 1 AU. **The Astrophysical Journal Letters**, IOP Publishing, v. 710, n. 1, p. l82, 2010.
- MATSUMURA, C. et al. Outer radiation belt boundary location relative to the magnetopause: Implications for magnetopause shadowing. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, American Geophysical Union (AGU), v. 116, A6, n/a–n/a, jun. 2011. DOI: [10.1029/2011ja016575](https://doi.org/10.1029/2011ja016575).
- MAUK, B. H. et al. Science Objectives and Rationale for the Radiation Belt Storm Probes Mission. **Space Science Reviews**, Springer Nature, v. 179, n. 1–4, p. 3–27, set. 2012. DOI: [10.1007/s11214-012-9908-y](https://doi.org/10.1007/s11214-012-9908-y).
- NORTHROP, Theodore G.; TELLER, Edward. Stability of the Adiabatic Motion of Charged Particles in the Earth's Field. **Physical Review**, American Physical Society (APS), v. 117, n. 1, p. 215–225, jan. 1960. DOI: [10.1103/physrev.117.215](https://doi.org/10.1103/physrev.117.215).
- RICHARDSON, IG; CANE, HV. **Near-Earth interplanetary coronal mass ejections since January 1996**. [S.l.: s.n.], 2017.
- ROEDERER, J. G. Dynamics of geomagnetically trapped radiation. Springer, 1970.
- SCHULTZ, Colin. Dynamics of the Earth's Radiation Belts and Inner Magnetosphere. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, Wiley Online Library, v. 94, n. 52, p. 509–509, 2013.
- SHABANSKY, V. P. Some processes in the magnetosphere. **Space Science Reviews**, Springer Nature, v. 12, n. 3, p. 299–418, jul. 1971. DOI: [10.1007/bf00165511](https://doi.org/10.1007/bf00165511).
- SHPRITS, Yuri Y et al. Review of modeling of losses and sources of relativistic electrons in the outer radiation belt II: Local acceleration and loss. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, Elsevier, v. 70, n. 14, p. 1694–1713, 2008.
- SHUE, J.-H.; CHAO, J. K. et al. A new functional form to study the solar wind control of the magnetopause size and shape. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, American Geophysical Union (AGU), v. 102, A5, p. 9497–9511, mai. 1997. DOI: [10.1029/97ja00196](https://doi.org/10.1029/97ja00196).
- SHUE, J.-H.; SONG, P. et al. Magnetopause location under extreme solar wind conditions. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, American Geophysical Union (AGU), v. 103, A8, p. 17691–17700, ago. 1998. DOI: [10.1029/98ja01103](https://doi.org/10.1029/98ja01103).
- STONE, E. C. et al. **Space Science Reviews**, Springer Nature, v. 86, n. 1/4, p. 1–22, 1998. DOI: [10.1023/a:1005082526237](https://doi.org/10.1023/a:1005082526237).
- TURNER, Drew L. et al. Explaining sudden losses of outer radiation belt electrons during geomagnetic storms. **Nature Physics**, Springer Nature, v. 8, n. 3, p. 208–212, jan. 2012. DOI: [10.1038/nphys2185](https://doi.org/10.1038/nphys2185).

UKHORSKIY, A. Y.; SITNOV, M. I. Dynamics of Radiation Belt Particles. **Space Science Reviews**, Springer Nature, v. 179, n. 1-4, p. 545–578, nov. 2012. DOI: [10.1007/s11214-012-9938-5](https://doi.org/10.1007/s11214-012-9938-5).