

DINÂMICA DA VARIABILIDADE DO FLUXO DE ELÉTRONS NO CINTURÃO EXTERNO DE RADIAÇÃO DURANTE OCORRÊN- CIAS DE EJEÇÃO DE MASSA CORONAL

RELATÓRIO PARCIAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA

(PIBIC/CNPq/INPE) PROCESSO: 144350/2019-0

VIGÊNCIA: DE 01/08/2019 A 31/09/2020

Verenna Rêgo Sant'Anna (EEL-USP, Bolsista PIBIC/CNPq)

E-mail: verenna@usp.br

Ligia Alves da Silva (INPE, State Key Laboratory of Space Weather, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Orientadora)

E-mail: ligia.silva@inpe.br

Flavia Reis Cardoso Rojas (EEL-USP, Co-orientadora)

E-mail: flaviacardoso@usp.br

Livia Ribeiro Alves (INPE, Co-orientadora)

E-mail: livia.alves@inpe.br

Julho de 2020

Verenna Rêgo Sant'Anna

DINÂMICA DA VARIABILIDADE DO FLUXO DE ELÉTRONS NO CINTURÃO EXTERNO DE RADIAÇÃO DURANTE OCORRÊNCIAS DE EJEÇÃO DE MASSA CORONAL

Verenna Rêgo Sant'Anna

Bolsista: Verenna Rêgo Sant'Anna

Ligia Alves da Silva

Orientadora: Dr. Ligia Alves da Silva

Lorena – SP

2020

RESUMO

O cinturão externo de radiação é preferencialmente populado por elétrons que são essencialmente governados pela dinâmica do movimento das partículas aprisionadas. Os seus movimentos, essencialmente são regidos pelas forças de Lorentz. Essas partículas energéticas tem sua dinâmica de movimento complexa, em que os intervalos de tempo próximos aos movimentos executados podem ser considerados como periódicos. Cada um desses movimentos está associado a uma invariante adiabática, em que o movimento de giro (“gyromotion”) da partícula em torno da linha do campo magnético está associado à primeira invariante, o movimento de ressalto (“bouncy”) ao longo da linha do campo magnético está associado ao segundo invariante, e por fim, o movimento de deriva (“drift”) em torno da Terra está associado ao terceiro invariante. Quando estruturas oriundas do Sol e imersas no vento solar se propagam para fora, perturbações no meio interplanetário são geradas, as quais podem gerar ondas de choque (ShW) que atingem a Terra e podem impactar direta ou indiretamente a magnetosfera externa e interna e, conseqüentemente, podem contribuir para violar uma ou mais invariantes adiabáticas. A violação destas invariantes adiabáticas pode causar aumentos (“enhancements”) ou diminuições (“dropouts”) do fluxo de elétrons no cinturão externo de Van Allen. Portanto, entender como diferentes tipos de ShW podem impactar de maneira diferente o cinturão externo de radiação foi objeto de estudo deste projeto no primeiro ano de desenvolvimento. Para execução deste referida análise, foram utilizados dados do cinturão de Van Allen e do meio interplanetário. O fluxo de elétrons de alta energia (1.8-3.4 MeV) do cinturão externo de radiação foi obtido a partir do instrumento REPT a bordo das sondas Van Allen A e B, e os parâmetros do vento solar foram obtidos a partir dos instrumentos MAG e SWEPAM a bordo do satélite ACE. A caracterização foi realizada a partir das tabelas disponibilizadas na literatura, em que diferentes eventos foram selecionados e classificados quanto aos diferentes tipos de choque, como retrocesso rápido (“fast reverse”) e avanço rápido (“fast forward”), assim como, quanto aos choques quase-paralelos e quase-perpendiculares.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	5
2. OBJETIVO.....	6
2.1 Objetivo Geral.....	6
2.2 Objetivos Específico.....	6
3. INSTRUMENTAÇÃO.....	6
3.1 Van Allen Probes.....	6
3.2 Advanced Composition Explor.....	7
3.3 Global Geospace Science Wind.....	7
4. METODOLOGIA.....	7
5. RESULTADOS.....	9
6. CONCLUSÃO.....	16
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	17

1. INTRODUÇÃO

O planeta Terra é protegido pela magnetosfera de partículas carregadas provenientes dos ventos solares e raios cósmicos. As partículas carregadas de altas energias ao entrarem na magnetosfera e interagirem com o campo geomagnético podem ser capturadas e aprisionadas, realizando movimentos confinados em torno da Terra, de tal modo que milhares de partículas carregadas, podem vir à formar cinturões dessas partículas envolvendo a Terra, dando origem aos cinturões de Van Allen, conhecidos como cinturão interno e externo de radiação [Northrop and Teller 1960; Roederer, 1970].

O cinturão externo de radiação, que é significativamente mais vulnerável a passagem de estruturas do vento solar é preferencialmente populado por elétrons. Estes são essencialmente governados pela dinâmica do movimento das partículas aprisionadas, e seus movimentos são essencialmente regidos pela força de Lorentz, que é resultado da superposição da força elétrica proveniente de um campo elétrico com a força magnética devida a um campo magnético atuando sobre uma partícula carregada eletricamente que se move no espaço [Roederer, 1970].

A dinâmica de aprisionamento de partículas carregadas nos cinturões de radiação, assim como, a variabilidade do fluxo de partículas, principalmente no cinturão externo ($\sim 3R_E - 7R_E$), e seus relativos impactos no ambiente espacial e atmosférico terrestre, são temas decisivos para a segurança do ambiente espacial e conhecimento da atmosfera da Terra. Portanto, entender como estruturas oriundas do Sol, como ejeção de massa coronal (CME) pode impactar a magnetosfera interna, especificamente o cinturão externo de Van Allen é assunto de grande importância para o entendimento da variabilidade do fluxo de partículas carregadas. Tal variabilidade pode ser identificada a partir do aumento (“enhancement”) ou diminuição (“dropout”) do fluxo de partículas [Baker, 1994; Baker and Kanekal, 2008; Alves et al. 2016, Da Silva et al., 2019], em que são consideradas importantes quando as variabilidades que atingem pelo menos 1 ordem de grandeza [Turner et al, 2012].

2. OBJETIVO

2.1. Objetivo Geral

O objetivo geral deste projeto é identificar os principais mecanismos dinâmicos associados a variabilidade do fluxo de elétrons em períodos de ICMEs.

2.2. Objetivos Específicos

- Revisão bibliográfica dos temas científicos como: cinturões de radiação de Van Allen, fluxo de elétrons no cinturão externo, dropout e enhancement no cinturão externo e dinâmica do cinturão externo durante chegada de ICMEs;
- Analisar os dados do instrumento Relativistic Electron Proton Telescope – REPT [Baker et al., 2013], Magnetic Electron Ion Spectrometer (MAGEIS) instalados a bordo das sondas Van Allen Probes para identificar a variabilidade do fluxo de elétrons (enhancement, dropout) no cinturão externo de radiação;
- Analisar os dados dos instrumentos Magnetic Field Experiment (MAG) e Solar Wind Electron, Proton and Alpha Monitor (SWEPAM) instalados a bordo do satélite Advanced Composition Explorer (ACE) para estudar os parâmetros do vento solar no ponto Lagrangeano L1 e identificar os períodos de ICMEs.
- Análise dinâmica e seleção dos eventos durante ocorrências de ICME;
- Identificação dos principais mecanismos associados à variabilidade do cinturão externo de radiação;
- Desenvolvimento do relatório e confecção de trabalhos para divulgar em conferências.

3. INSTRUMENTAÇÃO

3.1 Van Allen Probes

- Relativistic Electron Proton Telescope (REPT)
- Magnetic Electron Ion Spectrometer (MAGEIS)
- Electric and Magnetic Field Instrument Suite and Integrated Science (EMFISIS)

3.2 Advanced Composition Explorer (ACE)

- Magnetic Field Experiment (MAG)
- Solar Wind Electron, Proton and Alpha Monitor (SWEPAM)

3.3 Global Geospace Science Wind (WIND)

- Solar Wind and Suprathermal Ion Composition Experiment (SMS)
- Solar Wind Experiment (SWE)

4. METODOLOGIA

A metodologia utilizada para selecionar os eventos em estudo segue a base os critérios de seleção estabelecidos na literatura, no qual, primeiramente é identificado o fluxo de elétrons de alta energia a partir do site disponibilizado pelo grupo da Missão Van Allen Probes do Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory, conforme mostradas as Figuras 1-4 abaixo. Contudo, é importante destacar que devido o foco do presente trabalho estar concentrado nos impactos associados aos períodos de CMEs, foram analisados 25 eventos de variabilidade do fluxo de elétrons de alta energia, seguido de confirmação de períodos de CMEs a partir da tabela do Richardson, disponíveis no link: <http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icmetable2.htm>.

Para um melhor entendimento em relação às influências dos diferentes tipos de ondas de choque, foram observados e selecionados quatro eventos a partir destes 25 eventos selecionados na fase 1 do projeto. Portanto as Figuras 1-2 são coincidentes com períodos de ondas de choques quase-paralelos ($0^\circ < \text{TH_BN} < 45^\circ$) e as Figuras 3-4 são coincidentes com períodos de ondas de choques quase-perpendiculares ($45^\circ < \text{TH_BN} < 90^\circ$).

Observe as Figuras de 1-4 apresentam fortes variabilidades no fluxo de elétrons, em que no período de 30 dias são observadas ocorrências de variação significativos dropouts. Assim, os eventos selecionados para uma análise mais detalhada do tipo de estrutura solar ocorrem dentro de cada período apresentado nas Figuras 1-4.

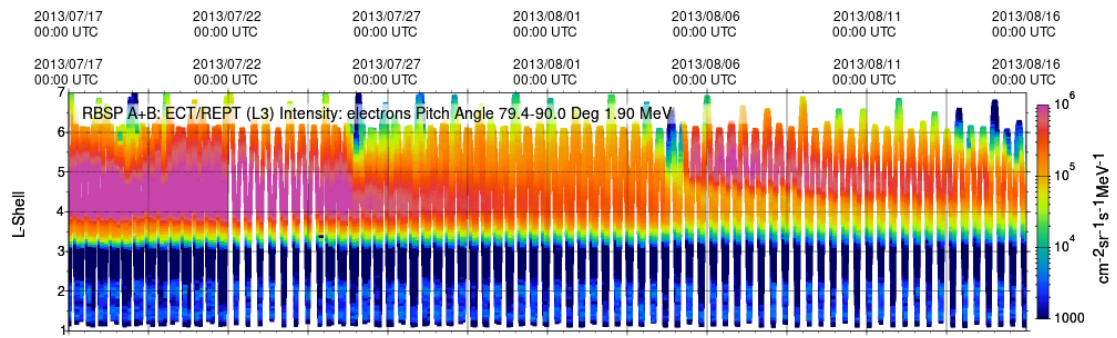


Figura 1: Fluxo de elétrons em um período de 30 dias feito a partir de dados das sondas Van Allen A e B interpolados (no meio o primeiro evento selecionado 01 de agosto de 2013).

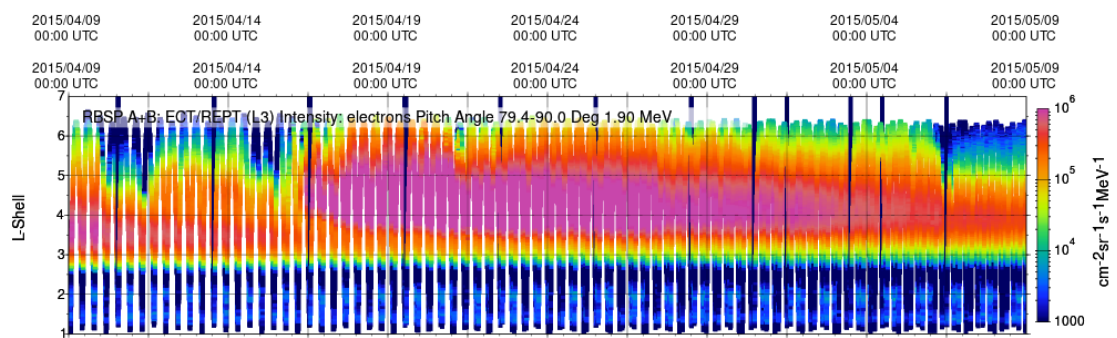


Figura 2: Fluxo de elétrons em um período de 30 dias feito a partir de dados das sondas Van Allen A e B interpolados (no meio o segundo evento selecionado 24 de abril de 2015).

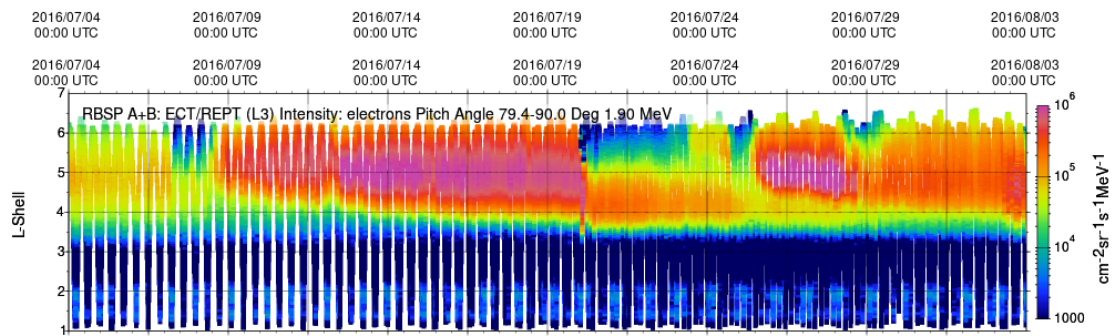


Figura 3: Fluxo de elétrons em um período de 30 dias feito a partir de dados das sondas Van Allen A e B interpolados (no meio o terceiro evento selecionado 19 de julho de 2016).

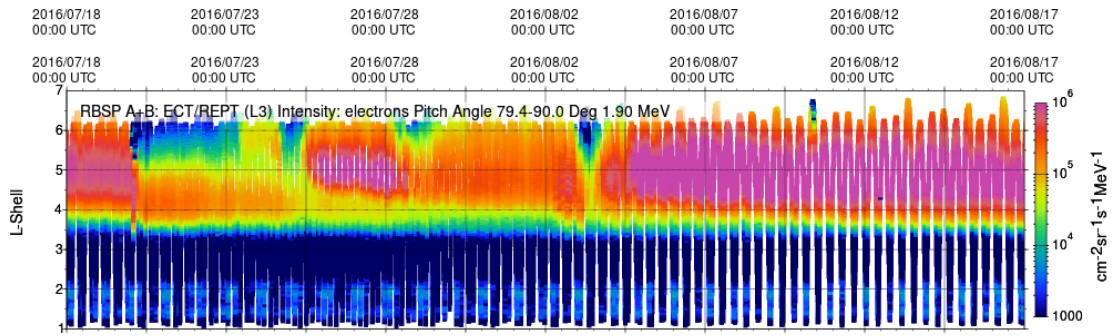


Figura 4: Fluxo de elétrons em um período de 30 dias feito a partir de dados das sondas Van Allen A e B interpolados (no meio o quarto evento selecionado 3 de agosto de 2016).

5. RESULTADOS

Os resultados foram obtidos conforme metodologia apresentada na seção 4, em que os eventos foram selecionados em períodos de ocorrência de CME. As Figuras 5-8 apresentam o fluxo de elétrons de alta energia, nível 2,10 MeV (painel a) e níveis de 1,8-3,4 MeV (painel b), parâmetros do vento solar, como, velocidade do vento solar, densidade, componentes do campo magnético e campo magnético total (painéis c-f) e a altura da magnetopausa estimada através do modelo empírico de Shue et al., [1998]. A Figura 5 apresenta o primeiro evento selecionado de ondas de choque quase-paralela, o qual mostra que não houve nenhuma variação significativa no fluxo de elétrons nos níveis de energia analisados (painéis a,b). As condições do meio interplanetário também parecem apresentar comportamento de pouca ou nenhuma perturbação, com velocidade do vento solar variando entre 300 e 400 km/s, densidade com valores $N_p < 5 \text{ #/cm}^3$ e B_x, B_y, B_z e B_t com valores $\text{IMF} < 5 \text{ nT}$. Isto impacta diretamente na altura da magnetopausa, que se apresenta relaxada ($\text{RMP} > 12R_E$) durante todo o evento. De acordo tabela 1 a onda de choque referente a esta estrutura é classificada como fast reverse (FR), isto significa que esta onda se propaga em direção ao sol.

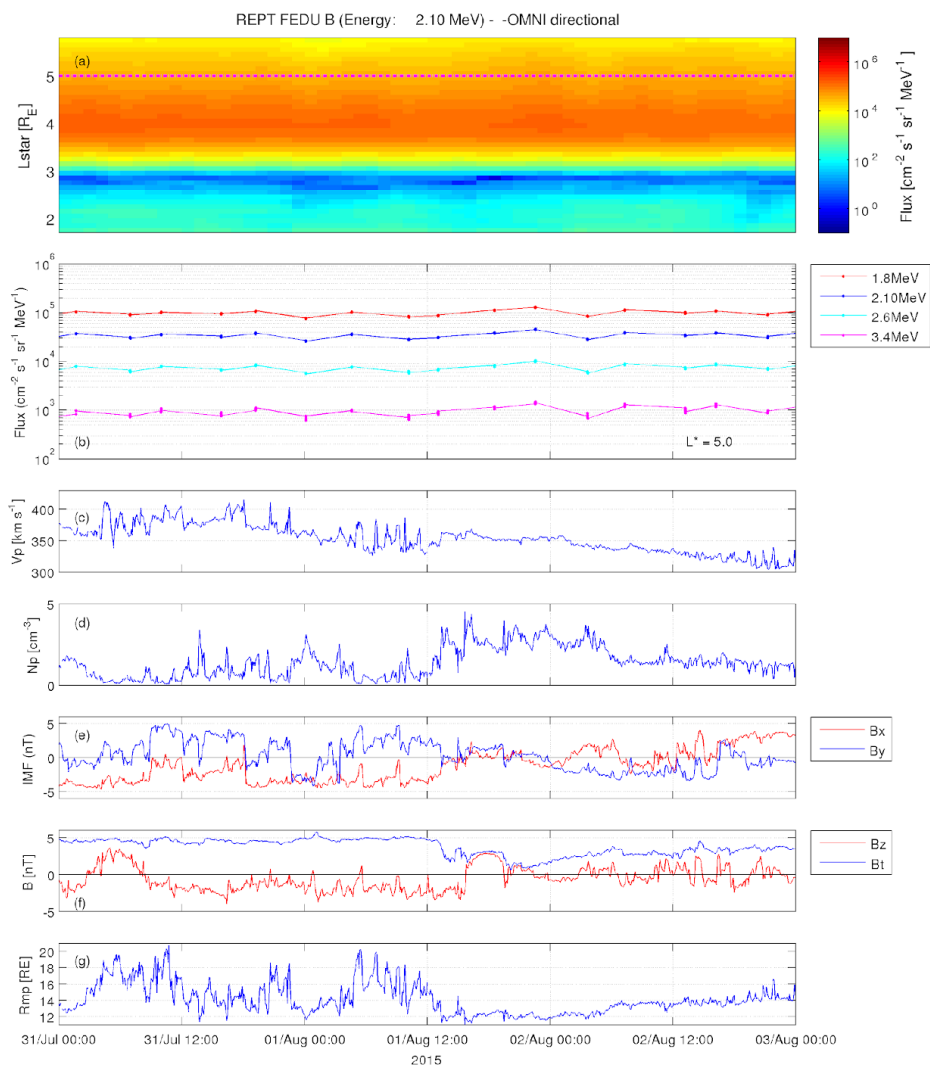


Figura 5: (a) Fluxo de elétrons na faixa de energia de 2.10 MeV em função de L^* (eixo vertical) e tempo (eixo horizontal); (b) Fluxo de elétrons nos canais de energia 1.8 MeV, 2.10 MeV, 2.6 MeV e 3.4 MeV com o L^* fixo em $L^* = 5.0 R_E$; (c) Velocidade do vento solar (V_p); (d) Densidade de partículas no meio interplanetário (N_p); (e) B_x e B_y , componentes do campo magnético interplanetário (IMF) em x e em y; (f) Intensidade do IMF, (B_t) e B_z , a componente do IMF em z. O fluxo de elétrons foi obtido pelo instrumento REPT a bordo da Van Allen Probes B. O V_p , N_p , B_t , B_z , B_x e B_y foram obtidos pelo satélite Advanced Composition Explorer (ACE) no ponto Lagrangeano L1; (g) compressão da magnetopausa pelo modelo de Shue [Shue et al., 1998]. O V_p , N_p , e B_z foram obtidos pelo satélite Advanced Composition Explorer (ACE) no ponto Lagrangeano L1.

A Figura 6 apresenta o segundo evento selecionado de ondas de choque quase-paralela, O comportamento do fluxo de elétrons de alta energia no cinturão externo de radiação, assim como, as condições do meio interplanetário apresentam semelhanças comparados

ao evento da Figura 5. O fluxo apresenta-se estável (painéis a,b) e a velocidade do vento solar varia entre 300 e 500 km/s, densidade com valores $N_p < 4 \text{ cm}^{-3}$ e B_x , B_y , B_z e B_t com valores $\text{IMF} < 5 \text{ nT}$. A altura da magnetopausa ($R_{MP} > 10 R_E$) confirma que a magnetosfera apresenta-se relaxada durante todo o evento. De acordo tabela 1 a onda de choque referente a este evento apresenta resultado inconclusivo.

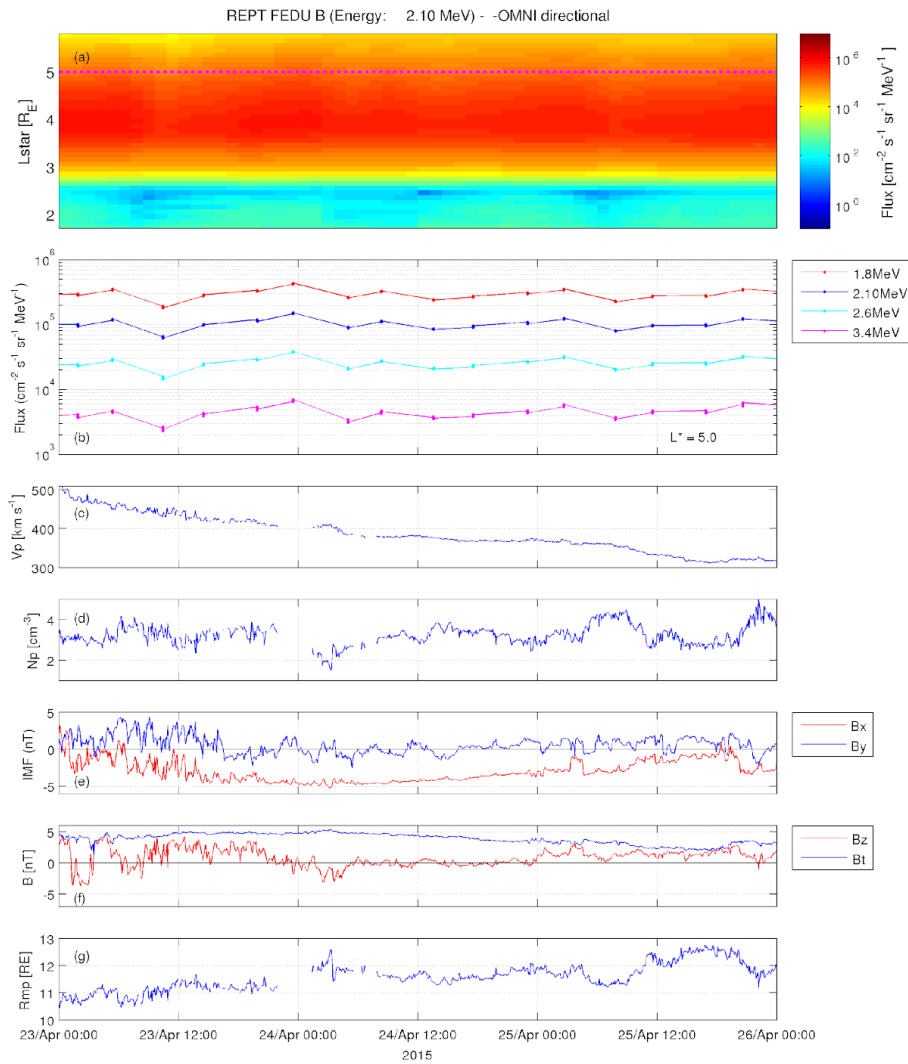


Figura 6: (a) Fluxo de elétrons na faixa de energia de 2.10 MeV em função de L^* (eixo vertical) e tempo (eixo horizontal); (b) Fluxo de elétrons nos canais de energia 1.8 MeV, 2.10 MeV, 2.6 MeV e 3.4 MeV com o L^* fixo em $L^* = 5.0 R_E$; (c) Velocidade do vento solar (V_p); (d) Densidade de partículas no meio interplanetário (N_p); (e) B_x e B_y , componentes do campo magnético interplanetário (IMF) em x e em y; (f) Intensidade do IMF, (B_t) e B_z , a componente do IMF em z. O fluxo de elétrons foi obtido pelo instrumento REPT a bordo da Van Allen Probes B. O V_p , N_p , B_t , B_z , B_x e B_y foram obtidos pelo satélite Advanced Composition Explorer (ACE) no ponto Lagrangeano L1; (g) compressão da magnetopausa pelo modelo de Shue [Shue et al., 1998]. O V_p , N_p , e B_z

foram obtidos pelo satélite Advanced Composition Explorer (ACE) no ponto Lagrangeano L1.

A Figura 7 apresenta o primeiro evento selecionado de ondas de choque quase-perpendicular, o qual mostra nitidamente que houve uma variação significativa no fluxo de elétrons nos níveis de energia analisados (painéis a,b), configurando-se como dropout com mais de 2 ordens de magnitude. As condições do meio interplanetário apresentam-se perturbados nas últimas horas do dia 19 de julho, as quais confirmam a presença de um CME, que também foi identificado através da tabela do Richardson. A velocidade do vento solar aumenta bruscamente mais de 100 km/s, nesse mesmo instante a densidade atinge valores $N_p \sim 40 \text{#/cm}^3$, enquanto B_x , B_y , B_z e B_t atingem valores IMF $> 20 \text{nT}$. Isto impacta diretamente na altura da magnetopausa, que é comprimida ($R_{MP} \sim 5R_E$) na hora da chegada desta referida estrutura, o que por sua vez contribui para a perda de partículas para fora da magnetopausa através do mecanismo de “magnetopause shadowing”. De acordo tabela 1 a onda de choque referente a esta estrutura é classificada como fast forward (FF), isto significa que esta onda se propaga em direção Terra.

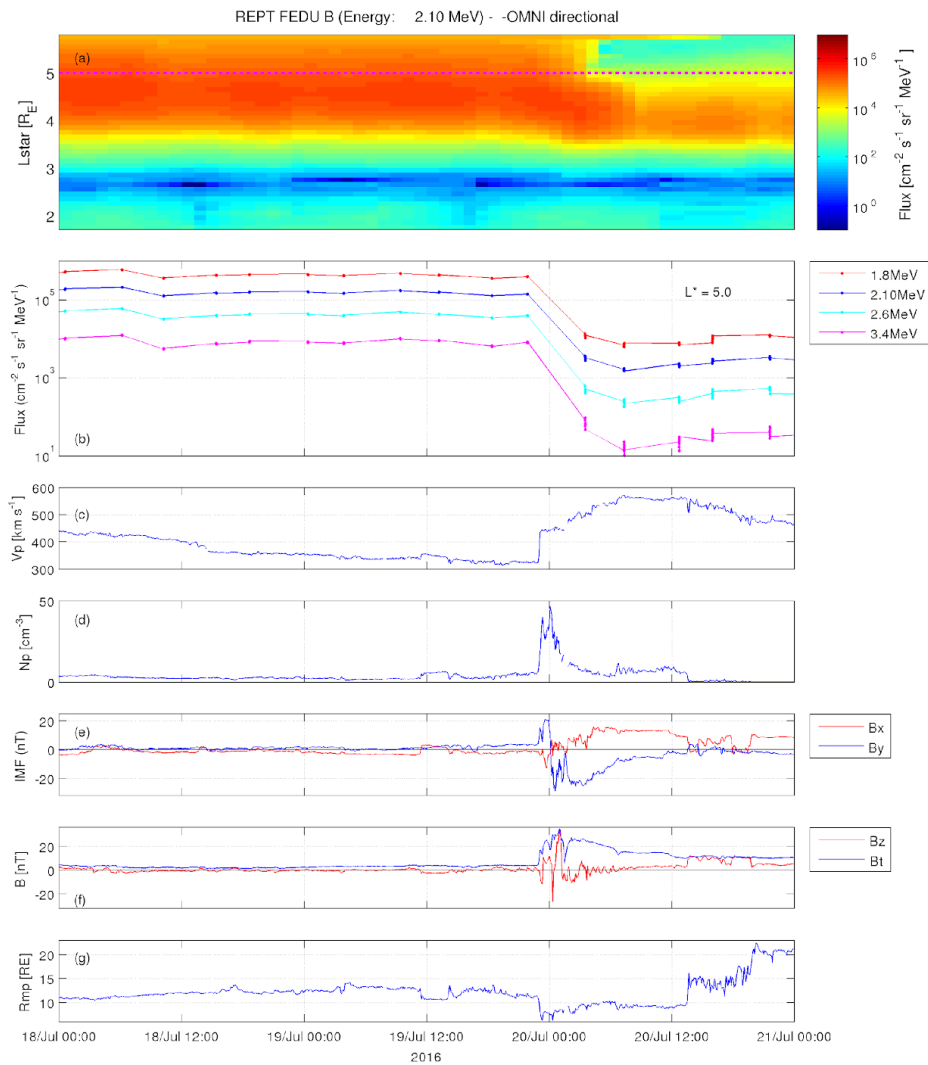


Figura 7: (a) Fluxo de elétrons na faixa de energia de 2.10 MeV em função de L^* (eixo vertical) e tempo (eixo horizontal); (b) Fluxo de elétrons nos canais de energia 1.8 MeV, 2.10 MeV, 2.6 MeV e 3.4 MeV com o L^* fixo em $L^* = 5.0 R_E$; (c) Velocidade do vento solar (V_p); (d) Densidade de partículas no meio interplanetário (N_p); (e) B_x e B_y , componentes do campo magnético interplanetário (IMF) em x e em y; (f) Intensidade do IMF, (B_t) e B_z , a componente do IMF em z. O fluxo de elétrons foi obtido pelo instrumento REPT a bordo da Van Allen Probes B. O V_p , N_p , B_t , B_z , B_x e B_y foram obtidos pelo satélite Advanced Composition Explorer (ACE) no ponto Lagrangeano L1; (g) compressão da magnetopausa pelo modelo de Shue [Shue et al., 1998]. O V_p , N_p , e B_z foram obtidos pelo satélite Advanced Composition Explorer (ACE) no ponto Lagrangeano L1.

A Figura 8 apresenta o segundo evento selecionado de ondas de choque quase-perpendicular, o qual mostra que houve diminuição (“dropout”) e aumento (“enhancement”) no fluxo de elétrons nos níveis de energia analisados (painéis a,b) durante o período estudado. As condições do meio interplanetário apresentam-se perturbados no

horário próximo ao 12:00 UT do dia 3 de agosto, as quais confirmam a presença de uma região de interação corrotante (CIR). A velocidade do vento solar aumenta bruscamente mais de 100 km/s, enquanto a densidade atinge baixos valores $N_p \sim 10\#/cm^3$, e o B_x , B_y , B_z e B_t atingem valores IMF $< 10nT$. A altura da magnetopausa não apresenta compressão significativa ($RMP \sim 8R_E$) na hora da chegada desta referida estrutura, mas é nítida a repopulação acontecendo após estas condições do meio interplanetário observadas, destacando ainda a ocorrência de flutuações alfvénicas, que sugerem a geração de ondas do tipo Ultra Low Frequency - ULF, conseqüentemente o mecanismo de difusão radial pode ter contribuído para esta repopulação identificada. De acordo tabela 1 a onda de choque referente a esta estrutura é classificada como fast reverse (FR), isto significa que esta onda se propaga em direção ao sol.

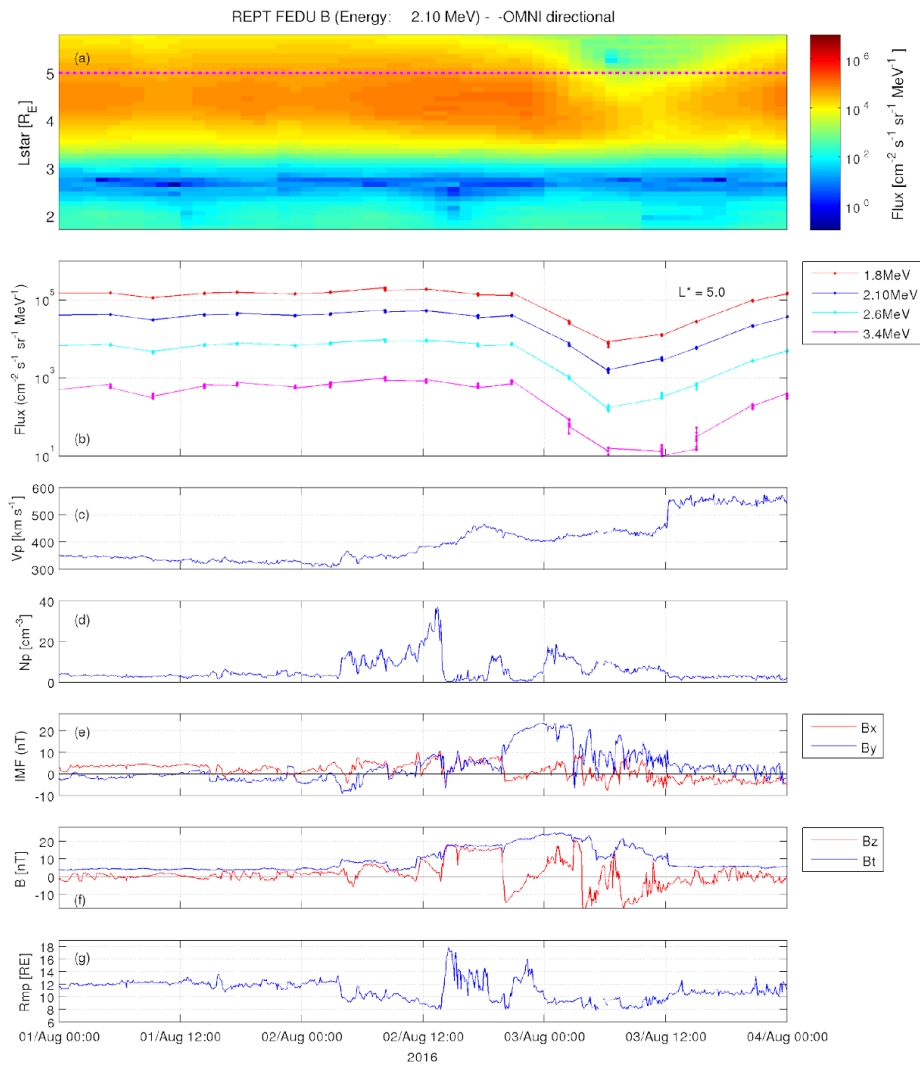


Figura 8: (a) Fluxo de elétrons na faixa de energia de 2.10 MeV em função de L^* (eixo vertical) e tempo (eixo horizontal); (b) Fluxo de elétrons nos canais de energia 1.8 MeV, 2.10 MeV, 2.6 MeV e 3.4 MeV com o L^* fixo em $L^* = 5.0 R_E$; (c) Velocidade do vento solar (V_p); (d) Densidade de partículas no meio interplanetário (N_p); (e) B_x e B_y , componentes do campo magnético interplanetário (IMF) em x e em y; (f) Intensidade do IMF, (B_t) e B_z , a componente do IMF em z. O fluxo de elétrons foi obtido pelo instrumento REPT a bordo da Van Allen Probes B. O V_p , N_p , B_t , B_z , B_x e B_y foram obtidos pelo satélite Advanced Composition Explorer (ACE) no ponto Lagrangeano L1; (g) compressão da magnetopausa pelo modelo de Shue [Shue et al., 1998]. O V_p , N_p , e B_z foram obtidos pelo satélite Advanced Composition Explorer (ACE) no ponto Lagrangeano L1.

Tabela 1: ShockSpeed/MC e ShockSpeed/VC foram obtidos pelo satélite WIND.

EVENTO	1	2	3	4
ShockSpeed/MC	108,8 km/s	339,2 km/s	265,1 km/s	291,6 km/s
ShockSpeed/VC	282,2 km/s	322,9 km/s	512,8 km/s	365,3 km/s
Shocktype	FR	NN	FF	FR
ThetaBn/MC	39,9°	28,9°	60,2°	66,8°
ThetaBN/VC	25,1°	28,8°	74,3°	87,6°

6. CONCLUSÃO

Segundo os eventos analisados pode-se concluir que a variabilidade do fluxo de elétrons de alta energia só foi detectada durante os eventos com ondas de choque quase-perpendiculares, nas quais foi possível observar uma queda significativa de fluxo (Figura 7,8) e aprimoramento de fluxo (Figura 8) no cinturão externo de radiação.

A diminuição do fluxo de elétrons de alta energia (Figura 7) ocorreu quase concomitantemente com o choque classificado como Fast Forward (FF). Isso significa que essas ondas de choque estão associadas a uma Ejeção de Massa Coronal Interplanetária – ICME. Esta classificação foi confirmada a partir da tabela *Near-Earth Interplanetary Coronal Mass Ejections* de Ian Richardson e Hilary Cane, a qual mostra que esta estrutura solar apresentou características claras de uma nuvem magnética.

O choque classificado como Fast Reverse (FR) ocorreu quase concomitantemente com o aprimoramento de fluxo de elétrons (Figura 8), isso significa que essas ondas de choque podem estar associadas a um HSS e contribuiram para a repopulação de elétrons no cinturão de radiação externo durante a ocorrência de flutuações Alfvénicas.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alves, L. A. (2016) Outer radiation belt dropout dynamics following the arrival of two interplanetary coronal mass ejections, *Geophysical Research Letters*, doi:10.1002/2015GL067066.

Baker, D.N., J.B. Blake, L.B. Callis, J.R. Cummings, D. Hovestadt, S. Kanekal, B. Klecker, R.A. Mewaldt, and R.D. Zwickl. (1994). Relativistic electron acceleration and decay time scales in the inner and outer radiation belts: SAMPEX, *Geophys. Res. Lett.*, 21(6), 409–412, doi:10.1029/93GL03532.

Baker, D.N., Kanekal S.G. (2008). Solar cycle changes, geomagnetic variations, and energetic particle properties in the inner magnetosphere, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Volume 70, Issues 2–4, Pages 195-206, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jastp.2007.08.031>.

Baker, D.N.; Kanekal, S.G.; Hoxie, V.C., et al. (2013). 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*, Volume 179, Issue 1-4, pp. 337-381.

Da silva, L. A. (2019) Contribution of ULF Wave Activity to the Global Recovery of the Outer Radiation Belt During the Passage of a High-Speed Solar Wind Stream Observed in September 2014, *JGR Space Physics*, doi:10.1029/2018JA026184

Northrop, Theodore G. and Teller, Edward. (1960). Stability of the Adiabatic Motion of Charged Particles in the Earth's Field, *Phys. Rev* 117, (1), 215--225, 10.1103/PhysRev.117.215.

Roederer, J. G. (1970). *Dynamics of geomagnetically trapped radiation*, in *Physics and Chemistry in Space*, vol. 2, edited by J. G. Roederer and J. Zahringer, 166 pp., Springer, Berlin.

Shue, J.-H., et al., (1998) Magnetopause location under extremes solar wind conditions, *J. Geophys. Res.*, 103, 17, 691.

Turner et al. (2012). Outer Radiation Belt Flux Dropouts: Current Understanding and Unresolved Questions in: Dynamics of the Earth's Radiation Belts and Inner Magnetosphere Geophysical Monograph Series 199, 2012.