



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

RELATÓRIO FINAL DO PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA

(PIBIC/CNPq/INPE) PROCESSO: 133686/2021-3

VIGÊNCIA: DE 01/09/2021 A 31/08/2022

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

Telefone: (21) 98110-4053 E-mail: verenna@usp.br

Ligia Alves da Silva (INPE, Orientadora)

Telefone: (12) 98231-5133 E-mail: ligia.silva@inpe.br

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

Telefone: (12) 98174-0642 E-mail: flaviacardoso@usp.br

Livia Ribeiro Alves (INPE, Co-orientadora)

Telefone: (12) 98217-7605 E-mail: livia.alves@inpe.br

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Av. dos Astronautas, 1758, 12.227-010 - São José dos Campos, SP
E-mail: pibic@inpe.br Telefone: (12) 3208-7771

Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de Lorena
Estrada Municipal do Campinho, s/n – Pte. Nova, Lorena, SP
E-mail: secretaria@debiq.ee.usp.br Telefone: (12) 3159-5000

Setembro de 2022

RESUMO

O cinturão de radiação externo é preferencialmente povoado por elétrons que são essencialmente governados pela dinâmica do movimento das partículas aprisionadas, em que as partículas energéticas executam movimentos periódicos complexos. Cada um desses movimentos está associado a um dos três invariantes adiabáticos, sendo eles, o movimento de giro ao redor da linha do campo magnético (primeiro invariante adiabático), movimento de ressalto ao longo da linha do campo magnético (segundo invariante adiabático) e movimento de deriva ao redor da Terra (terceiro invariante adiabático). Quando as estruturas do vento solar viajam para fora do Sol, elas podem gerar ondas de choque, pois atingem a Terra e podem impactar a magnetosfera externa e interna, e conseqüentemente podem contribuir para violar uma ou mais invariantes adiabáticos. Isso significa que o fluxo do cinturão de radiação externo pode diminuir ou aumentar. Vários mecanismos dinâmicos são investigados pela comunidade científica; por outro lado, o interesse deste trabalho é entender se diferentes tipos de ondas podem impactar de forma diferente no fluxo do cinturão de radiação externo. Dados de satélite foram empregados para o desenvolvimento deste estudo. Os resultados mostraram a ocorrência de dropout (diminuição de fluxo) no fluxo de elétrons de alta energia e que diferentes tipos de ondas podem ter contribuído para uma perda local de elétrons.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	4
2. OBJETIVO.....	5
2.1. Objetivo Geral.....	5
3. INSTRUMENTAÇÃO.....	6
3.1. Instrumentos a bordo das sondas Van Allen (VAP-A/B).....	6
3.2. Instrumentos a bordo do satélite Advanced Composition Explorer (ACE).....	6
3.3. Instrumentos a bordo do satélite Global Geospace Science Wind (WIND).....	6
4. METODOLOGIA.....	6
5. RESULTADOS.....	8
5.1. Condições do meio interplanetário e variabilidade do fluxo de elétrons de alta energia	8
5.1.1. Estudo de caso 1.....	8
5.1.2. Estudo de caso 2.....	10
5.2. Variabilidade do fluxo de elétrons de alta energia e seleção da Sonda Van Allen	12
6. CONCLUSÃO.....	19
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	19

1. INTRODUÇÃO

O planeta Terra é protegido pela magnetosfera de partículas carregadas dos ventos solares e dos raios cósmicos. Partículas carregadas de alta energia que entram na magnetosfera e interagem com o campo geomagnético podem ser capturadas e aprisionadas, fazendo movimentos confinados ao redor da Terra, de tal forma que milhares de partículas carregadas podem formar cinturões dessas partículas ao redor da Terra, dando origem aos cinturões de Van Allen, conhecidos como cinturões de radiação interno e externo [Northrop e Teller 1960; Roeder, 1970].

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

A dinâmica de aprisionamento de partículas carregadas nos cinturões de radiação, bem como a variabilidade do fluxo de partículas, especialmente no cinturão externo ($\sim 3RE - 7RE$), e seu impacto no ambiente atmosférico terrestre e no espaço, são questões decisivas para a segurança do espaço, ambiente e conhecimento da atmosfera terrestre.

Portanto, entender como diferentes tipos de ondas conjuntas de estruturas originárias do Sol, como ejeções de massa coronal interplanetária (ICMEs) podem impactar a magnetosfera da Terra a partir de um grande depósito de energia quase abruptamente [Ponomarev et al., 2006] é o assunto de interesse deste trabalho. Os ICMEs também podem excitar ondas magnetosféricas nos cinturões de Van Allen em uma ampla faixa de frequências, como ondas de chorus no modo whistler (centenas de Hz a aproximadamente 10 kHz) [por exemplo, Gurnett e O'Brien, 1964; Miyoshi et al., 2007]. Estes, ao interagir ressonantemente com elétrons presos no cinturão de radiação externo, podem violar o primeiro e/ou segundo invariantes adiabáticos, causando perda/aceleração localizada de partículas [Da Silva et al., 2019; Jaynes et al., 2015]. O mecanismo dinâmico impulsionado por ondas de chorus durante essas interações ressonantes pode contribuir significativamente para as variações de fluxo de partículas carregadas no cinturão de

radiação externo. Tal variabilidade pode ser identificada a partir do aumento ("enhancement") ou diminuição ("dropout") do fluxo de partículas [Baker, 1994; Baker e Kanekal, 2008; Alves et al. 2016, Da Silva et al., 2019], em que são considerados importantes quando a variabilidade atinge pelo menos 1 ordem de magnitude [Turner et al, 2012].

2. OBJETIVO

2.1. Objetivo Geral

- O objetivo geral deste projeto é identificar o papel de diferentes ondas na 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], instalado 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 em períodos de choque;
- Analisar os dados do instrumento Electric and Magnetic Field Instrument Suite and Integrated Science (EMFISIS) para detecção da atividade de diferentes ondas.
- Desenvolvimento do relatório e confecção de trabalhos para divulgação em conferências.

3. INSTRUMENTAÇÃO

O presente trabalho utiliza instrumentos a bordo de satélites in situ (Cinturão externo de radiação), assim como fora da magnetosfera (ponto Lagrangeano L1) para analisar o fluxo de elétrons de alta energia, atividade de ondas chorus e condições do meio interplanetário.

3.1. Instrumentos a bordo das sondas Van Allen (VAP-A/B)

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

3.2. Instrumentos a bordo do satélite Advanced Composition Explorer (ACE)

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

3.3. Instrumentos a bordo do satélite Global Geospace Science Wind (WIND)

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

4. METODOLOGIA

O fluxo de elétrons de alta energia no cinturão de radiação externo é obtido a partir do instrumento Relativistic Electron-Proton Telescope (REPT) [Baker et al., 2013]. A potência espectral do campo magnético é obtida a partir do instrumento Electric and Magnetic Field Instrument Suite and Integrated Science [EMFISIS, Kletzing et al., 2013] em que é possível detectar as atividades de diferentes tipos de ondas. Os instrumentos REPT e EMFISIS estão a bordo das sondas Van Allen Probes A e B [Mauk et al., 2012]. Os parâmetros do vento solar no ponto Lagrangeano L1 são estudados a partir dos instrumentos Magnetic Field Experiment (MAG), Solar Wind Electron, Proton e Alpha Monitor (SWEPAM) que estão a bordo do satélite Advanced Composition Explorer (ACE) [Stone et al., 1998].

Para selecionar o evento em estudo, utiliza-se os dados das sondas Van Allen, do satélite ACE e uma lista (https://www.cfa.harvard.edu/shocks/wi_data/) que disponibiliza informações acerca dos diferentes tipos de ondas de choque, conforme mostrado na

Tabela 1. No primeiro ano quatro eventos foram selecionados, sendo o primeiro e o segundo eventos coincidentes com a classificação quase-paralela ($0^\circ < TH_BN < 45^\circ$), enquanto os terceiro e quarto eventos são coincidentes com a classificação quase-perpendiculares ($45^\circ < TH_BN < 90^\circ$). A primeira análise realizada com estes eventos diz respeito às condições do meio interplanetário, com as quais é possível realizar a identificação do tipo de estrutura do vento solar, e seus potenciais para causar impacto na magnetosfera. Em seguida, analisa-se a variabilidade do fluxo de elétrons de alta energia no cinturão de radiação externo, para identificar as ocorrências de *dropouts* e/ou *enhancements*. Para finalizar o estudo, calcula-se a potência espectral do campo magnético para identificar a atividade das ondas chorus. Utilizando a técnica que fornece a informação das características destas ondas a partir das medições dos bursts em altíssima resolução, pode-se verificar as potencialidades das ondas chorus para acelerar elétrons ou lançá-los no cone de perda.

No segundo ano trabalhamos com os eventos do tipo quase perpendicular buscando entender o papel das ondas chorus na variabilidade do fluxo, os dois eventos analisados são apresentados na tabela abaixo. No terceiro ano focamos em um evento para poder entender o papel de outras ondas nessa variação, estudamos o caso 1 e analisamos ondas do tipo Hiss e magnetossônicas.

Tabela 1: Ângulo de inclinação das estruturas do vento solar e suas respectivas velocidades e tipos de choques. Estes parâmetros de ondas de choque foram calculados a partir dos dados do satélite Wind.

Caso	1	2
Data	07/19/2016	08/03/2016
Horário	23:02	12:21
Velocidade do choque/MC	265.1 km/s	291.6 km/s
Velocidade do choque/VC	512.8 km/s	365.3 km/s

Tipo de choque	Fast Forward	Fast Reverse
ThetaBn/MC	60.2°	66.8°
ThetaBn/VC	74.3°	87.6°

5. RESULTADOS

5.1. Condições do meio interplanetário e variabilidade do fluxo de elétrons de alta energia

Os eventos foram selecionados em períodos de ocorrência de CMEs. As Figuras 1 e 2 mostram 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, bem como a velocidade do vento solar, a densidade, as componentes do campo magnético do meio interplanetário e o campo magnético total (painéis c - f), e a altura da magnetopausa (panel g), que foi estimada através do modelo empírico de Shue et al. [1998].

5.1.1. Estudo de caso 1

A Figura 1 mostra o primeiro evento selecionado de acordo com o ângulo de inclinação o qual se refere ao tipo quase-perpendicular. O fluxo de elétrons de alta energia apresenta uma diminuição expressiva que atinge aproximadamente $L_{star} > 4.8$ (painéis a, b), com mais 2 ordens de magnitude. Portanto, configura-se como *dropout*. As condições do meio interplanetário são perturbadas nas últimas horas do dia 19 de julho, o que confirma a presença de um CMEs, também identificado através da tabela de Richardson. A velocidade do vento solar aumenta abruptamente em mais de 100 km/s concomitante com o aumento da densidade (N_p) que atinge ~ 40 prótons/cm³. As componentes do campo magnético interplanetário B_x , B_y , B_z e o campo magnético total B_t atingem valores IMF > 20 nT. Isso impacta diretamente a altura da magnetopausa, que é comprimida (RMP $\sim 5RE$) no momento da chegada dessa estrutura do vento solar, o que por sua vez contribui para a perda de partículas fora da magnetopausa através do mecanismo de "magnetopause shadowing". Portanto, este evento deve ser analisado quanto a atividade de ondas whistler no modo chorus, a qual permite a identificação de outros mecanismos responsáveis pela variabilidade no fluxo de elétrons de alta energia observados aqui.

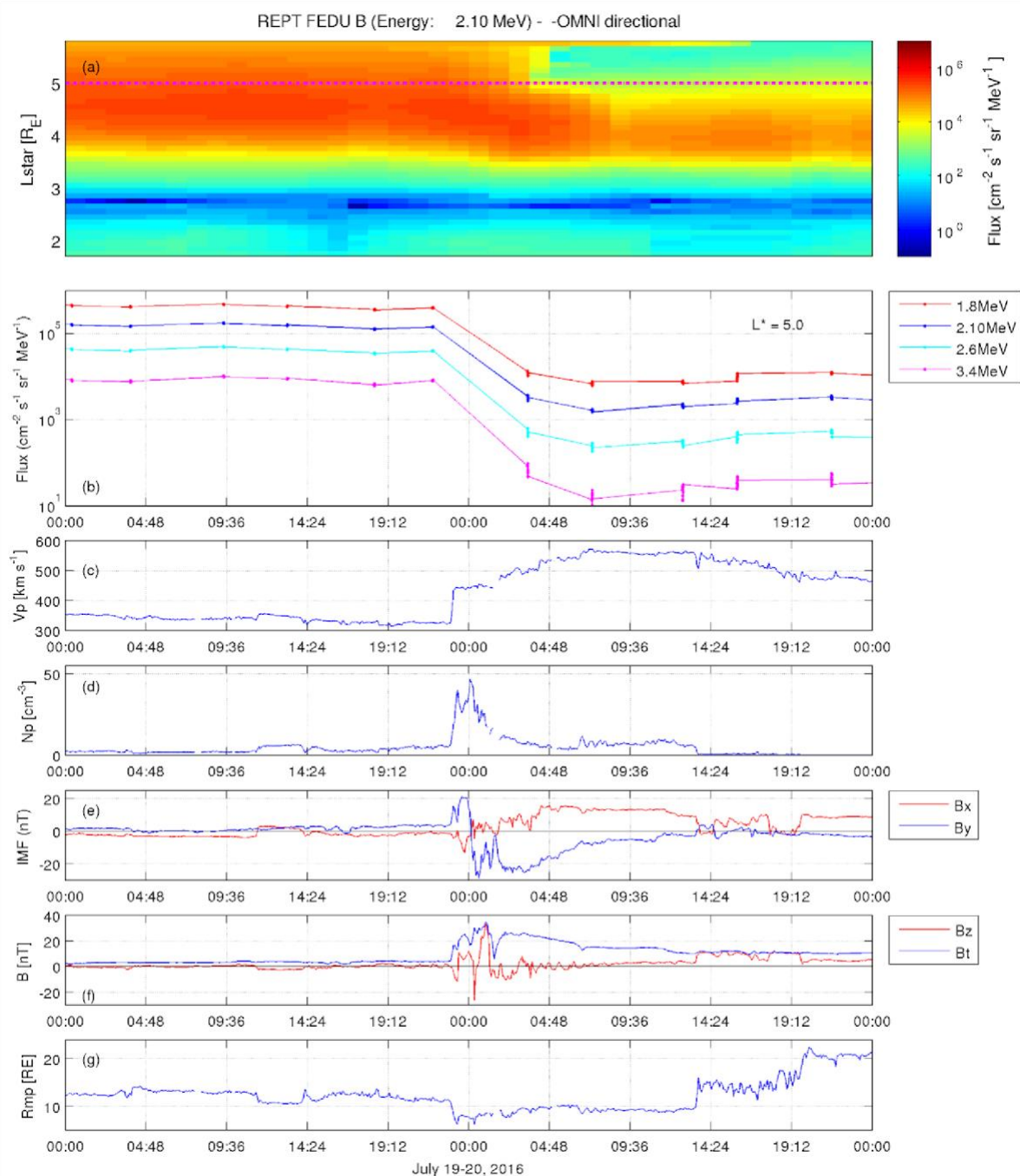


Figura 1: (a) Fluxo de elétrons na faixa de energia de 2.10 MeV em função de L^* (eixo vertical) e tempo (eixo horizontal); (b) Fluxo de elétrons nos canais de energia 1.8 MeV, 2.10 MeV, 2.6 MeV e 3.4 MeV com o L^* fixo em $L^* = 5.0 R_E$; (c) Velocidade do vento solar (V_p); (d) Densidade de partículas 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.

5.1.2. Estudo de caso 2

A Figura 2 mostra o segundo evento selecionado de acordo com o ângulo de inclinação o qual se refere ao tipo quase-perpendicular. O fluxo de elétrons de alta energia apresenta uma diminuição (*dropout*) seguida de um aumento (*enhancement*) que atinge aproximadamente 2 ordens de grandeza (painéis a, b). As condições do meio interplanetário são consideravelmente perturbadas por volta das 12h00 UT do dia 3 de agosto, em que a velocidade do vento solar aumenta gradativamente em mais de 100 km/s, principalmente após o aumento da densidade. As componentes B_x , B_y , B_z e o campo magnético total B_t atingem valores $IMF < 10nT$. A altura da magnetopausa não apresenta forte compressão ($RMP \sim 8RE$) no momento da chegada desta estrutura. Embora seja suficiente para ativar o mecanismo de *magnetopause shadowing*, que contribui para a ocorrência de *dropout* observada. O período de repopulação do fluxo de elétrons ocorre concomitante a possíveis assinaturas de flutuações alfvénicas, que normalmente estão associadas a chegada de uma estrutura do vento solar chamada de feixes rápidos (*High Speed solar wind Stream - HSS*). Esta análise sugere que é de grande importância investigar o papel das ondas chorus na variabilidade do fluxo de elétrons para este evento.

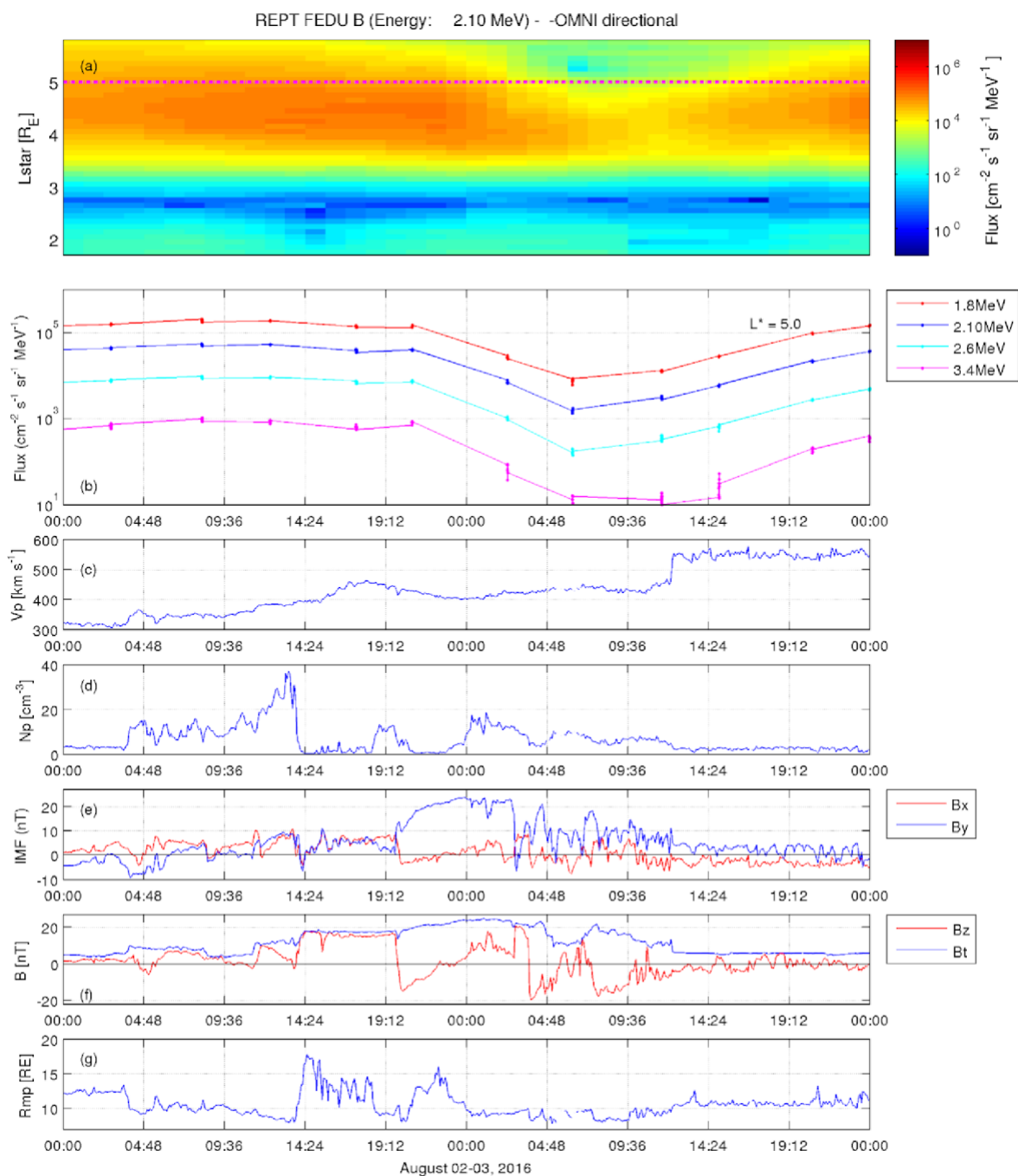


Figura 4: (a) Fluxo de elétrons na faixa de energia de 2.10 MeV em função de L^* (eixo vertical) e tempo (eixo horizontal); (b) Fluxo de elétrons nos canais de energia 1.8 MeV, 2.10 MeV, 2.6 MeV e 3.4 MeV com o L^* fixo em $L^* = 5.0 R_E$; (c) Velocidade do vento solar (V_p); (d) Densidade de partículas 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.

5.2. Variabilidade do fluxo de elétrons de alta energia e seleção da Sonda Van Allen

Conforme discutido na seção anterior, no segundo ano de pesquisa apenas os eventos do tipo quase-perpendicular foram analisados quanto ao papel das ondas chorus na variabilidade do fluxo de elétrons de alta energia. No terceiro somente o primeiro evento foi analisado e apresenta-se abaixo a Figura 3, a qual se refere ao fluxo de elétrons de alta energia (canais de 1.8 MeV até 4.2 MeV) utilizando as sondas Van Allen A e B, respectivamente. As linhas verticais vermelhas representam os horários do Theta Bn, as quais serão utilizadas como referenciais para as análises desta seção.

Observa-se na Figura 3 que ligeiramente após o horário de identificação do ângulo de inclinação da estrutura do vento solar, que é um CME, o fluxo de elétrons diminui significativamente. Identifica-se claramente que a sonda A é a mais apropriada para as análises das ondas chorus considerando o evento 1, pois esta sonda está no apogeu poucas horas após o registro do Theta_Bn.

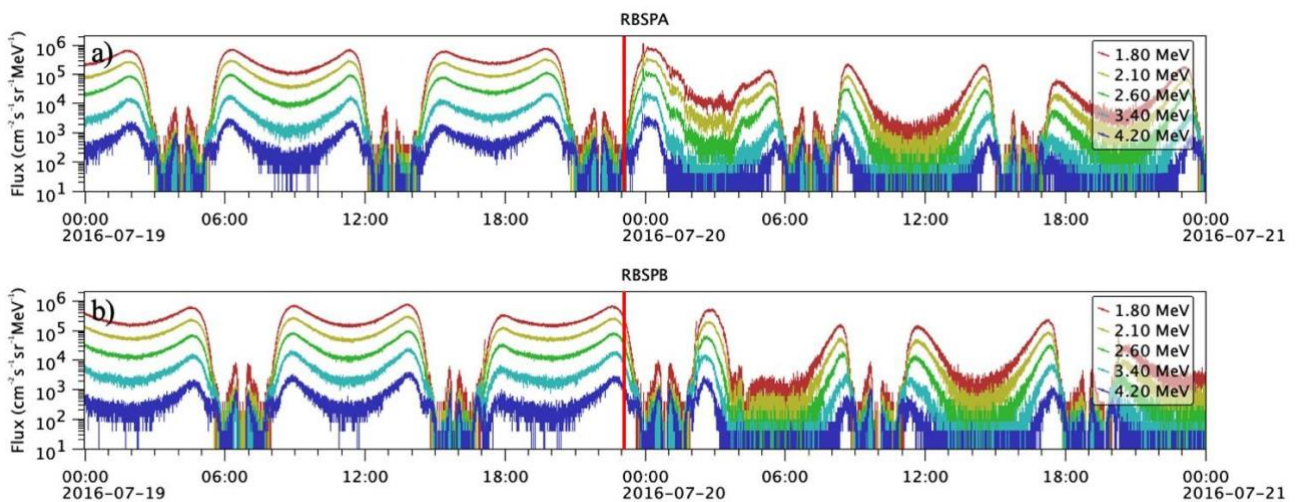


Figura 3: a) Fluxos de elétrons de alta energia obtidos a partir do instrumento REPT (VAP-A) referentes aos canais de 1,8 MeV, 2,10 MeV, 2,6 MeV, 3,4 MeV e 4,2 MeV para o período de 48 h (00:00 Ut 19 de julho de 2016 às 00:00 UT 21 de julho de 2016). b) Fluxos de elétrons de alta energia obtidos a partir do instrumento REPT (VAP-B) referentes aos canais de 1,8 MeV, 2,10 MeV, 2,6 MeV, 3,4 MeV e 4,2 MeV para o período de 48 h (00:00 UT de 19 de julho - 00:00 UT de 21 de julho de 2016). As linhas verticais vermelhas representam os horários do Theta_Bn.

5.2.1. O papel da onda chorus na variabilidade do fluxo de elétrons de alta energia

As ondas chorus do modo whistler são ondas de plasma naturais que ocorrem na magnetosfera da Terra [Helliwell, 1969; Storey, 1953]. Suas assinaturas são geralmente observadas na região fora da plasmasfera [Burton & Holzer, 1974; Lauben et al., 2002; LeDocq e tal., 1998]. As ondas chorus normalmente ocorrem em uma ampla faixa de frequência, que abrange desde centenas de Hz até cerca de 10 kHz [Gurnett & O'Brien, 1964]. Estas são geradas pela instabilidade ciclotrônica do elétron próxima ao equador [Agapitov et al., 2012, 2013; LeDocq et al., 1998] em associação com elétrons injetados no plasma [Kennel & Petschek, 1966]. A atividade das ondas chorus normalmente se intensifica durante a fase principal e de recuperação das atividades geomagnéticas [Agapitov et al., 2015, 2018; Meredith et al., 2001; Da Silva et al., 2019].

A figura 4 (painéis a-b) apresenta os espectrogramas de campo magnético obtidos a partir do instrumento EMFISIS (VAP-A) referentes ao evento 1. O painel (c) mostra a atividade dos Bursts que é obtida através do mesmo instrumento citado, mas em altíssima resolução. Os períodos dos Bursts correspondem a um período de densidade espectral magnética mais alta, conforme mostrado no painel (b). A atividade de ondas chorus é observada a partir de aproximadamente 00:30 do dia 20 de julho de 2016, em que um pacote desta onda será analisado a partir de 00:33 UT, conforme mostrado na figura abaixo. É importante destacar que este horário é ligeiramente após o horário de identificação do ângulo de inclinação da estrutura do vento solar. Assim pode-se sugerir que estas ondas foram geradas sob influência do CME. O painel (c) apresenta um exemplo de identificação dos Bursts e a possibilidade de caracterizar as ondas chorus.

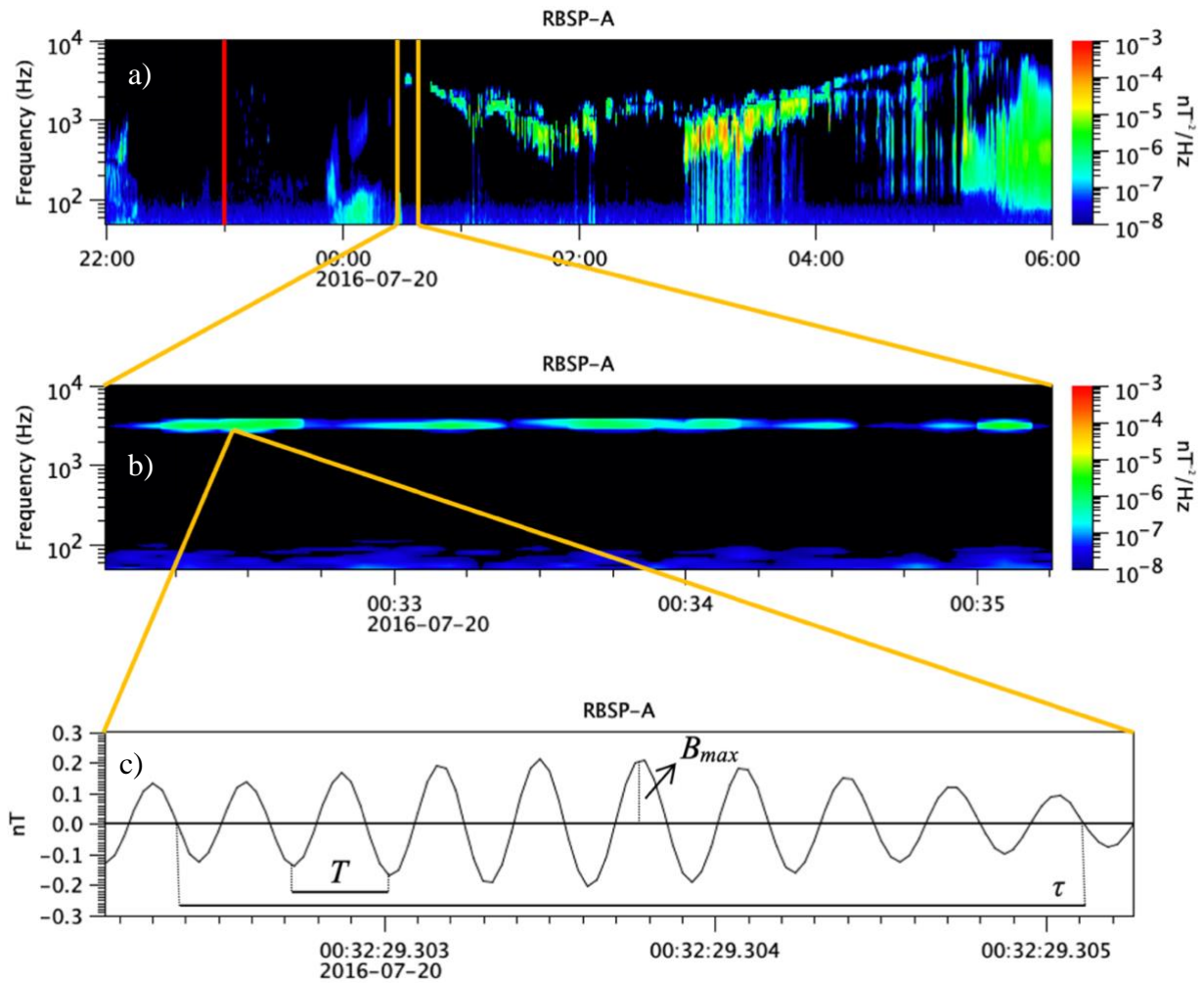


Figura 4: a) Espectrograma do campo magnético obtidos a partir do instrumento EMFISIS para o período de 8 h (22:00 Ut de 19 de julho de 2016 às 06:00 UT de 20 de julho de 2016). b) Espectrograma do campo magnético obtidos a partir do instrumento EMFISIS para o período de 6 min (00:32 UT a 00:36 UT de 20 de julho de 2016). c) As medições do campo magnético de alta resolução correspondentes a um período de maior densidade espectral magnética. A linha vertical vermelha representa o horário do Theta_Bn.

Vários subelementos de chorus foram identificados durante os intervalos em que os dados do modo burst estavam disponíveis. Os parâmetros relevantes para caracterizar as ondas chorus são: B_{max} , que é o valor absoluto instantâneo máximo da amplitude da onda, T , que corresponde a um período de ciclo de onda, e τ , que é a duração de tempo do subelemento. Observa-se que os valores das amplitudes das ondas e dos seus respectivos pacotes de ondas, assim como os períodos das ondas e de seus pacotes de ondas são compatíveis com os resultados de Da Silva et al. [2019] e Alves et al. [2016]. Portanto, pode-se sugerir que os mecanismos de *pitch angle scattering* e *diffusion* tenham contribuído localmente para a ocorrência de variabilidade no cinturão externo de Van Allen. Para confirmar tal

sugestão faz-se necessário utilizar outras técnicas, como o cálculo do ângulo normal da onda (*wave normal angle - WNA*) e a densidade de espaço de fase (*Phase space density - PhSD*) que será assunto abordado na próxima fase deste projeto.

O PhSD é uma importante ferramenta para confirmar os mecanismos dinâmicos relacionados à diminuição do fluxo de elétrons de alta energia no cinturão de radiação externo sob a influência do ICME e sua região de bainha turbulenta. O PhSD é calculado em função dos parâmetros μ , K e L^* , que são invariantes adiabáticos que restringem os movimentos dos elétrons [Da Silva, 2019].

Calculamos a mudança no ângulo de inclinação de acordo com a Equação 1 abaixo sofrida por um elétron como resultado da interação ressonante do cíclotron com a onda de coro para todo o período do subelemento τ , bem como com apenas um período do ciclo de onda T .

$$\Delta\alpha_i = \frac{B_{max}}{B_0} \frac{\Omega_e}{\gamma} \Delta t_i \quad (1)$$

Onde B_{max} é a amplitude de pico do pacote de onda instantânea, B_0 a magnitude do campo magnético ambiente equatorial, Ω é a frequência do cíclotron de elétrons, γ o fator de Lorentz e $\Delta t_i = iV_g/V_s$ (Lakhina et al., 2010). O termo Δt_i é a razão entre o tamanho da escala do subelemento de coro iV_g , onde i pode ser τ (duração de tempo do subelemento) ou T (correspondente a um período do ciclo de onda) e V_s . V_g é a velocidade de grupo e V_s é a velocidade relativa relativística entre a onda de coro e a velocidade de ressonância paralela do elétron calculada no quadro do satélite.

Tabela 2: Parâmetros usados em 1 para quatro subelementos de coro de tempo diferente 20-07-2016 (A)

Time chorus subelements	B_{max} (nT)	T (ms)	τ (ms)
00:32:29.342.15 – 00:32:29.344.22	0,27	0,29	2,09
00:32:34.817.38 – 00:32:34.821.00	0,26	0,21	3,07
00:32:29.296.58 – 00:32:29.298.29	0,29	0,32	2,74

00:32:29.333.05 – 00:32:29.335.72	0,38	0,28	2,66
-----------------------------------	------	------	------

5.2.2. O papel das ondas Hiss e ondas magnetossônicas e na variabilidade do fluxo de elétrons de alta energia

Dentro da magnetosfera existem diferentes tipos de ondas que interagem com os elétrons energéticos aprisionados nos cinturões de radiação da Terra como na figura 5. As ondas de plasma podem ser detectadas, como as ondas Hiss [Meredith et al., 2004] e magnetossônicas [Boardsen et al., 2016]. As ondas plasmassféricas Hiss são consideradas como emissão do modo whistler de Frequência Extremamente Baixa (20 Hz - poucos kHz) [Meredith et al., 2004; Cao et al., 2005]. As ondas magnetossônicas rápidas podem ser tipicamente detectadas entre a girofrequência de prótons e a frequência de ressonância híbrida mais baixa [por exemplo, Russell et al., 1969; Ma et al., 2013, Da Silva et al., 2019]. As ondas plasmassféricas Hiss foram medidas em baixa latitude dentro do cinturão de radiação interno ($L = \sim 1-2$) desde a década de 70 (Tsurutani et al. 1975).

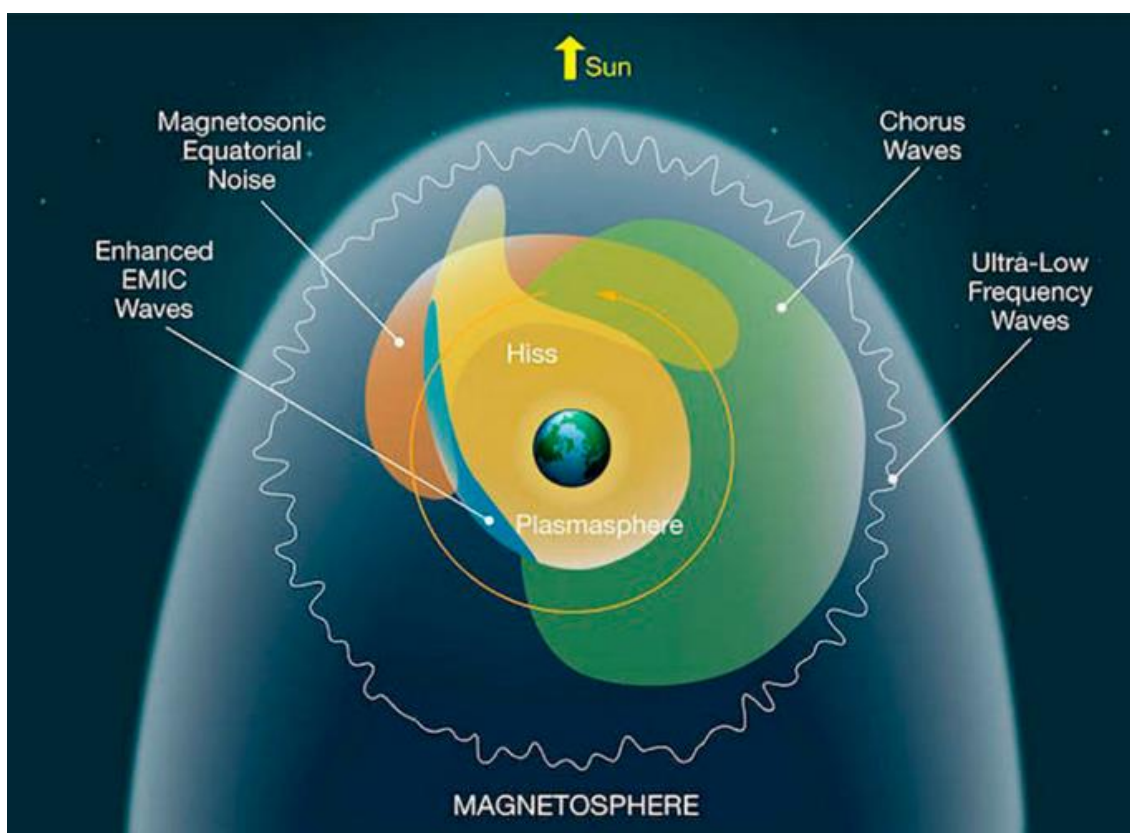


Figura 5: Diagrama esquemático mostrando tipos de onda que afetam os elétrons energéticos nos cinturões de radiação da Terra

As ondas de plasma, como a plasmasférica Hiss e as ondas magnetosônicas, podem ser detectadas no cinturão de radiação interno. Esta região pode ser coincidente com a região da plasmasfera e será identificada pela densidade eletrônica total. A densidade eletrônica total é um parâmetro fundamental do plasma; aqui especificamente, é usado para mapear regiões da magnetosfera, como a plasmasfera. Este parâmetro é estimado através das medições de alta frequência obtidas do instrumento EMFISIS a bordo das Sondas Van Allen, que é capaz de medir um único componente de campo elétrico de ondas na faixa de frequência de 10 a 500 kHz. Essas medições de frequência mais alta permitem a determinação da densidade eletrônica total na espaçonave, que pode ser inferida a partir da frequência de ressonância híbrida superior [Da Silva et al., 2019].

Na Figura 6 podemos ver o espectrograma do campo magnético para o evento analisado. No primeiro painel temos plotado a densidade, inferimos a densidade eletrônica total a partir dos dados medidos pelo instrumento Electric Field and Waves (EFW) (Wygant et al., 2013). Ela é uma ferramenta muito importante pois é a partir dela que conseguimos distinguir regiões com plasma mais denso ou menos denso, porém para o horário que analisamos não tínhamos disponível a informação da densidade. No segundo painel temos uma visão ampliada das ondas que analisamos para esse evento.

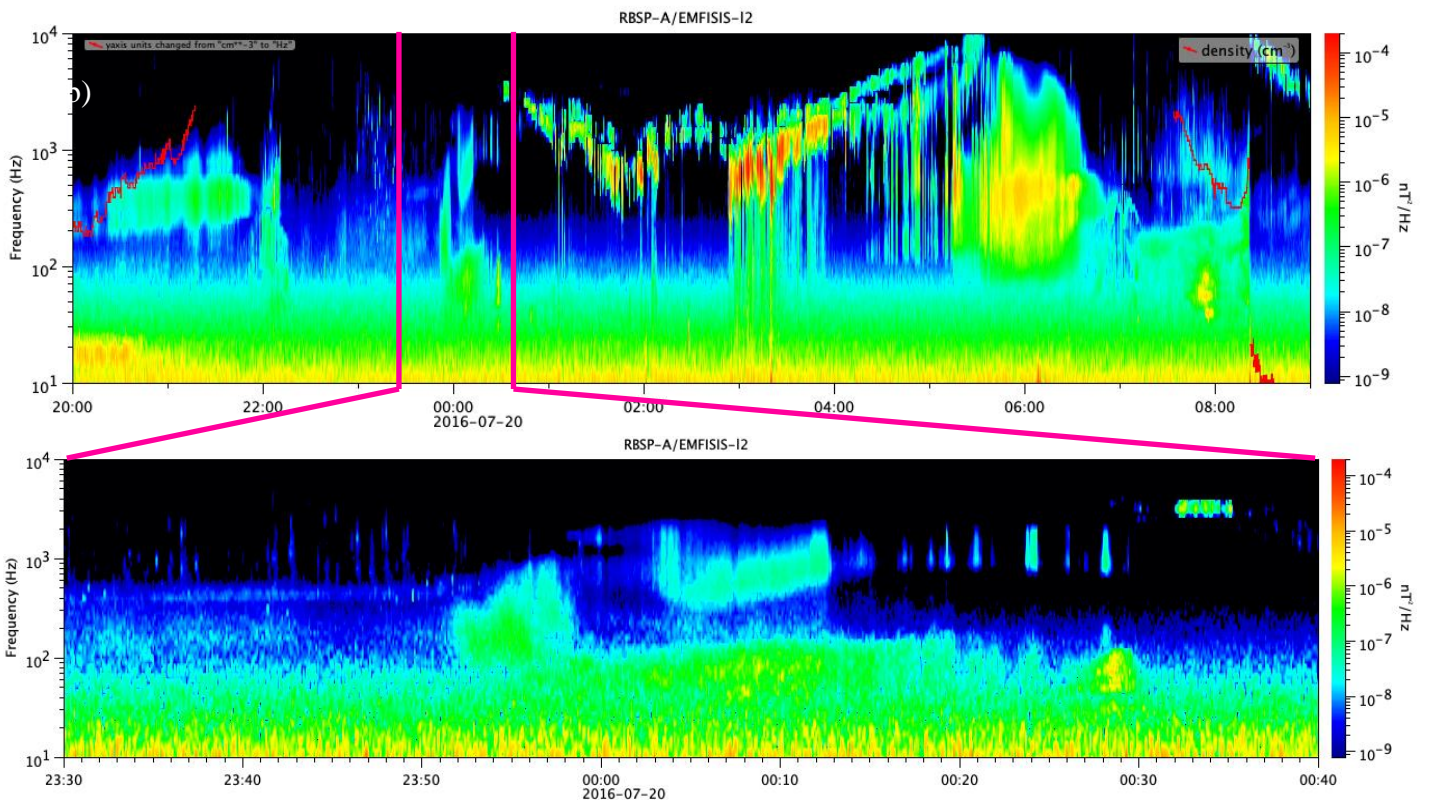


Figura 6: a) Espectrograma do campo magnético obtidos a partir do instrumento EMFISIS para o período de 8 h (20:00 Ut de 19 de julho de 2016 às 09:00 UT de 20 de julho de 2016). b) Espectrograma do campo magnético obtidos a partir do instrumento EMFISIS para o período de 70 min (23:30 UT de 19 de julho de 2016 a 00:40 UT de 20 de julho de 2016). A linha vermelha representa a densidade.

Na Figura 7 é possível notar no primeiro painel ondulações perto de meia noite, essas ondulações em diferentes níveis de energia são variações no fluxo de elétrons do cinturão externo de radiação. Se analisarmos o segundo painel podemos ver que no horário em que ocorre a variação citada anteriormente há a presença de uma onda que baseado na literatura e pela sua faixa de frequência podemos supor que sejam Hiss e magnetossônicas.

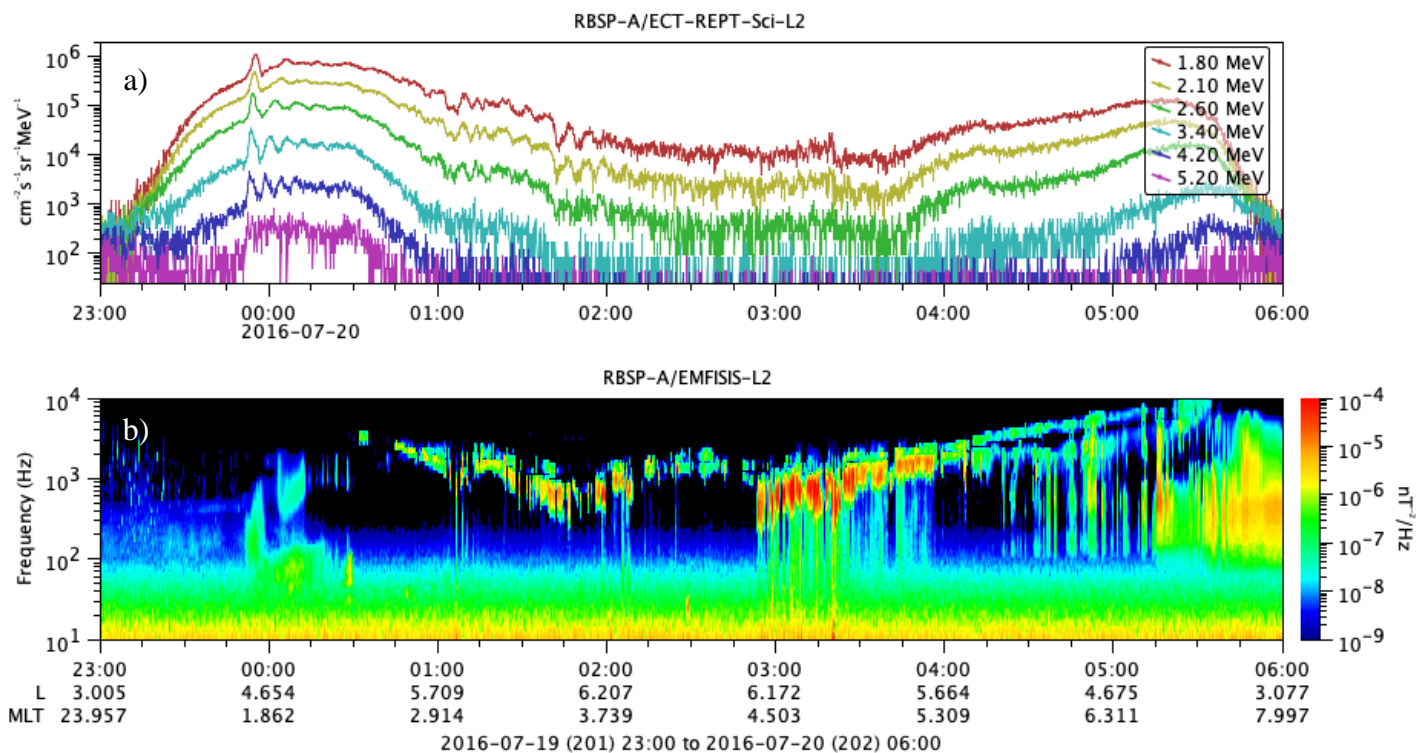


Figura 7: a) Fluxos de elétrons de alta energia obtidos a partir do instrumento REPT (VAP-A) referentes aos canais de 1,8 MeV, 2,10 MeV, 2,6 MeV, 3,4 MeV, 4,2 MeV e 5,2 MeV para o período de 7 h (23:00 Ut 19 de julho de 2016 às 06:00 UT 20 de julho de 2016). b) Espectrograma do campo magnético obtidos a partir do instrumento EMFISIS para o período de 7 h (23:00 Ut 19 de julho de 2016 às 06:00 UT 20 de julho de 2016).

6. CONCLUSÃO

A variabilidade do fluxo de elétrons de alta energia é detectada durante ondas do tipo Hiss e magnetossônicas (Figura 7) no cinturão de radiação externo. A perda ocorreu localmente e não foi concomitantemente com a onda de choque. Isso significa que essas ondas podem ter contribuído para uma queda local no fluxo no cinturão de radiação externo, porém não para a variabilidade significativa que foi observada com a chegada da onda de choque. Ondas Hiss e magnetossônicas possuem faixas de frequências muito parecidas e para conseguir diferenciar as duas será necessário o aprofundamento em outras técnicas que serão alvo de estudo no quarto ano de pesquisa.

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.

Boardsen, S. A., Hospodarsky, G. B., Kletzing, C. A., Engebretson, M. J., Pfaff, R. F., Wygant, J. R., Kurth, W. S., Averkamp, T. F., Bounds, S. R., Green, J. L., and De Pascuale, S. (2016). Survey of the frequency dependent latitudinal distribution of the fast magnetosonic wave mode from Van Allen Probes Electric and Magnetic Field Instrument and Integrated Science waveform receiver plasma wave analysis. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 121(4), 2902–2921. <https://doi.org/10.1002/2015JA021844>

Cao, J. B., Liu, Z. X., Yang, J. Y., Yian, C. X., Wang, Z. G., Zhang, X. H., Wang, S. R., Chen, S. W., Bian, W., Dong, W., Zhang, Z. G., Hua, F. L., Zhou, L., Cornilleau-Wehrin, N., de Laporte, B., Parrot, M., Alleyne, H., Yearby, K., Santolík, O., and Mazelle, C. (2005). First results of low frequency electromagnetic wave detector of TC-2/Double Star program. *Annales Geophysicae*, 23(8), 2803–2811. <https://doi.org/10.5194/angeo-23-2803-2005>

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.

Horne, R. B., & Thorne, R. M. (1998). Potential waves for relativistic electron scattering and stochastic acceleration during magnetic storms. *Geophysical Research Letters*, 25, 3011–3014. <https://doi.org/10.1029/98GL01002>.

Kletzing, C. A., Kurth, W. S., Acuna, M., MacDowall, R. J., Torbert, R. B., Averkamp, T., Bodet, D., Bounds, S. R., Chutter, M., Connerney, J., Crawford, D., Dolan, J. S., Dvorsky, R., Hospodarsky, G. B., Howard, J., Jordanova, V., Johnson, R. A., Kirchner, D. L., Mokrzycki, B., ... Tyler, J. (2013). The electric and magnetic field instrument suite and integrated science (EMFISIS) on RBSP. *Space Science Reviews*, 179(1–4), 127–181. <https://doi.org/10.1007/s11214-013-9993-6>

Ma, Q., Li, W., Thorne, R. M., and Angelopoulos, V. (2013). Global distribution of equatorial magnetosonic waves observed by THEMIS. *Geophysical Research Letters*, 40(10), 1895–1901. <https://doi.org/10.1002/grl.50434>

Meredith, N. P., Horne, R. B., Thorne, R. M., Summers, D., and Anderson, R. R. (2004). Substorm dependence of plasmaspheric hiss. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 109(A6), 6209. <https://doi.org/10.1029/2004JA010387>

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](https://doi.org/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.

Russell, C. T., Holzer, R. E., and Smith, E. J. (1969). OGO 3 observations of ELF noise in the magnetosphere: 1. Spatial extent and frequency of occurrence. *Journal of Geophysical Research*, 74(3), 755–777. <https://doi.org/10.1029/ja074i003p00755>

Stone, E. C., Frandsen, A. M., Mewaldt, R. A., Christian, E. R., Margolies, D., Ormes, J. F., & Snow, F. (1998). The Advanced Composition Explorer. *Space Science Reviews*, 86(1/4), 1–22. <https://doi.org/10.1023/A:1005082526237>.

Shprits, Y. Y. (2009). Potential waves for pitch-angle scattering of near equatorially mirroring electrons due to violation of the second adiabatic invariant. *Geophysical Research Letters*, 36, L12106. <https://doi.org/10.1029/2009GL038322>.

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

Tsurutani B. T., Smith E. J. and Thorne R. M. (1975). Electromagnetic hiss and relativistic electron loss in the inner zone. *Journal of Geophysical Research*. 80,600-607.

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.

Wygant, J. R., Bonnell, J. W., Goetz, K., Ergun, R. E., Mozer, F. S., Bale, S. D., Ludlam, M., Turin, P., Harvey, P. R., Hochmann, R., Harps, K., Dalton, G., McCauley, J., Rachelson, W., Gordon, D., Donakowski, B., Shultz, C., Smith, C., Diaz-Aguado, M., ... Tao, J. B. (2013). The Electric Field and Waves Instruments on the Radiation Belt Storm Probes Mission. *Space Science Reviews*, 179(1–4), 183–220. <https://doi.org/10.1007/s11214-013-0013-7>