



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

ESTUDO DA INTERAÇÃO ENTRE O VENTO SOLAR E A MAGNETOSFERA TERRESTRE

Pedro Pires Ferreira

Relatório final de Iniciação Científica orientado pelo(a) Dr(a). Luis Eduardo Antunes Vieira e co-orientado pelo(a) Dr(a). Flavia Reis Cardoso

URL do documento original:

[<http://urlib.net/>](http://urlib.net/)

INPE

São José dos Campos

2016



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

ESTUDO DA INTERAÇÃO ENTRE O VENTO SOLAR E A MAGNETOSFERA TERRESTRE

Pedro Pires Ferreira

Relatório final de Iniciação Científica orientado pelo(a) Dr(a). Luis Eduardo Antunes Vieira e co-orientado pelo(a) Dr(a). Flavia Reis Cardoso

URL do documento original:

[<http://urlib.net/>](http://urlib.net/)

INPE

São José dos Campos

2016



Esta obra foi licenciada sob uma Licença Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), processo No. 800010/2014-0.

RESUMO

O vento solar é um fluxo de partículas ionizadas provenientes do sol, resultado da diferença de pressão entre a coroa solar e o espaço interplanetário. O principal fenômeno responsável pela entrada dessas partículas na região de domínio do campo magnético da Terra é a reconexão magnética, que pode ser definida como uma reestruturação topológica do campo magnético causada pela interação do campo interplanetário com o campo da Terra. Evento de transferência de fluxo (FTE) é um fenômeno associado à reconexão magnética, que é caracterizado pela assinatura bipolar da componente normal do campo magnético da magnetopausa, portanto, são perturbações nas medidas do campo. Este trabalho consiste no estudo da interação vento solar-magnetosfera através da análise de uma simulação magnetohidrodinâmica utilizando a ferramenta da NASA CCMC (*Community Coordinated Modeling Center*), visando o estudo da reconexão magnética e especialmente eventos de transferência de fluxo. Por meio do estudo do campo magnético normal no ponto subsolar da magnetopausa, de protuberâncias na pressão, velocidade das partículas, topologias magnéticas, e densidade de corrente, foi feita a identificação, estudo, e caracterização de um evento de transferência de fluxo, através da comparação entre modelos existentes e trabalhos relacionados que tentam explicar a formação dos FTEs a partir da reconexão magnética. Em paralelo, foram realizadas atividades de divulgação científica e aperfeiçoamento acadêmico, incluindo participação em eventos, congressos científicos, e elaboração de artigos científicos.

Palavras-chave: Magnetosfera. Vento solar. Reconexão magnética. Eventos de Transferência de Fluxo. Magnetopausa.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	1
1.1 Interação vento solar-magnetosfera terrestre	1
1.2 Conceitos gerais sobre a reconexão magnética	4
1.3 Eventos de transferência de fluxo	10
1.3.1 O modelo de Russel e Elphic	11
1.3.2 Outros modelos teóricos	13
2 OBJETIVOS	17
2.1 Objetivo geral	17
2.2 Objetivos específicos	17
3 METODOLOGIA	19
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
5 PARTICIPAÇÃO EM EVENTOS E DIVULGAÇÃO CIENTÍFICA	41
5.1 Participação em congressos e eventos científicos	41
5.2 Divulgação científica	42
6 CONCLUSÕES	45
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49

1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

1.1 Interação vento solar-magnetosfera terrestre

Em razão à dependência aos sistemas tecnológicos espaciais e terrestres o estudo das interações entre as partículas emitidas do Sol com o campo magnético terrestre torna-se cada vez mais necessário na sociedade atual. O clima espacial (OLIVEIRA; SILVEIRA, 2016) tem por objetivo estudar a relação entre os processos físicos no sistema Sol-Terra e sua influência no ambiente terrestre. Tais efeitos podem afetar os dispositivos tecnológicos e a vida humana (JR et al., 2011). Portanto, o estudo da dinâmica dos fenômenos provocados pela atividade solar são de grande importância para o ser humano e para a tecnologia terrestre.

O Sol é a estrela central do nosso sistema planetário e de grande importância para a humanidade, sendo composto por gases como hidrogênio e hélio. Essa estrela gera luz e energia para a vida humana através de reações termonucleares que ocorrem em seu núcleo. Pode-se dividir essa estrela em camadas, sendo a cromosfera, coroa e fotosfera as camadas que fazem parte da atmosfera solar e a zona convectiva, zona de radiação e o núcleo as camadas internas. Foi em 1937 que Hans Albrecht descreveu as reações termonucleares ocorridas no núcleo solar, onde quatro prótons são fundidos em um núcleo de hélio, liberando energia (FILHO et al., 2000).

O vento solar é um fluxo de partículas ionizadas - em sua maioria constituído por núcleos de hidrogênios ionizados e elétrons - provenientes do Sol que permeia o meio interplanetário. Esse vento é resultado da diferença de pressão existente entre a coroa solar, a camada mais externa da atmosfera solar, e o espaço interplanetário, vencendo a força gravitacional do Sol, que faz com que o gás ionizado se expanda para o meio interplanetário do campo magnético solar (HUNDHAUSEN, 1972). A primeira evidência da existência do vento solar surgiu quando Ludwig Biermann, em 1951, percebeu que a cauda dos cometas era formada numa direção radial ao Sol, suspeitando que deveria existir um fluxo de partículas na direção anti-solar que arrastava a poeira cometária. Após essa observação, várias teorias surgiram, como a de Hannes Alfvén em 1957 (ALFVEN, 1957), postulando que esse fluxo de partículas provenientes do Sol carregava consigo as linhas do campo magnético solar. Eugene Parker, posteriormente, desenvolvendo matematicamente a teoria do que ficaria sendo conhecido como vento solar, demonstrou que a densidade do mesmo não deveria passar de 30 partículas/cm³ (JR et al., 2011). As primeiras medidas, *in situ*,

que vieram comprovar o modelo proposto por Parker foram obtidas pelos sensores de plasma do satélite Explorer 10, em 1961, e posteriormente pelo satélite Mariner 2 (CRAVENS, 2004).

A maior parte dos estudos sobre o vento solar são feitos por meio de observações e simulações numéricas. Através desses estudos, foi possível determinar suas propriedades físicas. Em condições "calmas", ou seja, durante baixa atividade solar, a sua velocidade é de aproximadamente 400 km/s, a densidade de aproximadamente 5 partículas/cm³ com uma fração menor que 4% de íons He^{++} e um campo magnético de cerca de 5 nT. Pode-se classificá-lo como vento solar rápido, quando é originado nos buracos coronais, regiões mais frias e menos densas da coroa solar em altas latitudes, sendo relacionados com as linhas do campo magnético "abertas"¹, e como vento solar lento, quando é originado em regiões próximas ao equador do Sol, sendo esse um fluxo mais denso (RUSSELL, 2001).

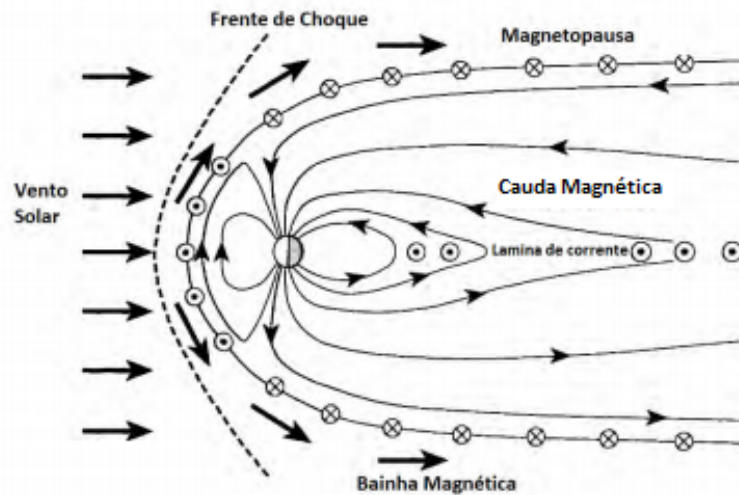
O vento solar propaga-se pelo meio interplanetário e atinge o campo magnético terrestre, formando a chamada magnetosfera, que é a região no espaço onde o campo magnético terrestre rege os processos físicos existentes. O campo magnético é gerado por correntes que circulam no interior do planeta e sistemas de correntes atmosféricas. A Figura 1.1 apresenta as regiões mais importantes que compõem a magnetosfera terrestre. O lado diurno, região voltada para o Sol, estende-se por 10 raios terrestres² em condições de vento solar calmo. As regiões observadas no lado esquerdo da Figura 1 são principalmente a frente de choque (ECHER et al., 2006) que está representada na Figura 1.1 por linhas tracejadas, magnetopausa, bainha magnética e as cúspides polares. O lado noturno, não-iluminado pelo Sol (lado direito da Figura 1), é conhecido como cauda magnetosférica pelo seu formato de cauda provocado pelo arraste do vento solar, podendo chegar a distâncias superiores a 200 raios terrestres (RUSSELL, 2001; SIBECK; LIN, 2014).

Na Figura 1.1, pode-se observar a existência de uma espécie de "barreira" para o plasma do vento solar, chamada de frente de choque, desacelerando suas partículas, transformando energia cinética em térmica, conseqüentemente, aquecendo-as. Esse fenômeno acontece pelo fato do vento solar apresentar velocidades maiores que a velocidade característica do meio, criando uma onda de choque. Depois de atravessar

¹Não existem literalmente linhas do campo magnético abertas devido à impossibilidade da existência de um único polo magnético isolado. Porém, esse termo é frequentemente usado para se referir a linhas do campo que se fecham em uma distância muito grande em relação à origem desse campo.

²1 raio terrestre é aproximadamente 6370 km.

Figura 1.1 - Representação simplificada da magnetosfera terrestre que é formada a partir da interação do vento solar com o campo magnético terrestre. O lado diurno da magnetosfera corresponde ao lado esquerdo da imagem, direção na qual está situado o Sol, enquanto o lado noturno é a região da cauda, situada no lado direito da figura.



Fonte: Adaptado de (ELPHIC; RUSSELL, 1979)

essa frente de choque, as partículas ainda passam por uma região de forte turbulência, conhecida como bainha magnética, onde as características do meio diferem das propriedades físicas do vento solar e da magnetosfera terrestre. Nas altas latitudes próximas às regiões dos polos existem as cúspides polares, que são as regiões onde as partículas tem mais facilidade para penetrar na atmosfera terrestre devido ao fato das linhas do campo serem verticais em relação à superfície do planeta. Esse é um dos motivos pelo qual, nas regiões de altas latitudes, são observadas as auroras - fenômeno ocasionado pela interação do vento solar com a atmosfera do planeta.

A região noturna da magnetosfera, localizada na direção anti-solar, é um grande reservatório de energia e plasma, mais conhecida como cauda magnetosférica. Na cauda existem dois lóbulos distintos, o norte, onde as linhas do campo magnético são direcionadas para o planeta, e o sul na qual as linhas do campo magnético são contrárias às do lóbulo norte, existindo entre eles uma corrente conhecida como lâmina de corrente³ - como pode ser visto na Figura 1.1.

³A lâmina de corrente surge na fronteira entre os campos magnéticos distintos, de acordo com a lei de Ampère, que compõe o conjunto das leis de Maxwell.

O vento solar se propaga pelo meio interplanetário com o campo magnético "congelado" a ele, e as magnetosferas planetárias funcionam como se fossem escudos protetores à essas partículas ionizadas. O campo magnético solar, conhecido como campo magnético interplanetário, juntamente com o vento solar interage com a magnetosfera terrestre, dando origem à um fenômeno conhecido como reconexão magnética, que possibilita a entrada de energia na magnetosfera, criando perturbações em seu campo magnético e sistemas de correntes, gerando tempestades e subtempestades magnéticas (JUNIOR; ALVES, 2015; JR et al., 2011).

1.2 Conceitos gerais sobre a reconexão magnética

A interação vento solar-magnetosfera terrestre está diretamente relacionada à condição de "quebra do congelamento" das linhas do campo magnético. Portanto, para uma melhor análise dessas interações, é necessário conhecer os pilares da teoria magneto-hidrodinâmica (MHD), que é utilizada para o estudo dos fenômenos da magnetosfera. A teoria MHD considera os íons e elétrons como constituintes de um único fluido regido por equações de conservação e estado que satisfazem as equações de Maxwell (BAUMJOHANN et al., 1996).

A primeira equação MHD é a equação da continuidade, que compreende a conservação da matéria em um plasma,

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \nabla \cdot (n\mathbf{u}) = 0, \quad (1.1)$$

onde n representa a densidade numérica e \mathbf{u} o vetor velocidade média do fluxo de plasma.

A segunda equação MHD é a equação de conservação de *momentum*, que garante a relação entre a variação do *momentum* e as forças eletromagnéticas e de gradientes de pressão sobre ele:

$$\frac{\partial(nm\mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (nm\mathbf{u}\mathbf{u}) = -\nabla \cdot P + \rho\mathbf{E} + \mathbf{j} \times \mathbf{B}, \quad (1.2)$$

onde P é o tensor pressão de plasma, ρ , a densidade de carga elétrica do plasma, m , a massa das partículas e \mathbf{E} , \mathbf{B} e \mathbf{j} são, respectivamente, o vetor campo elétrico, campo magnético e densidade de corrente elétrica.

Por fim, a última equação MHD é a equação de conservação de energia:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[nm \left(\frac{1}{2} u^2 + w \right) + \frac{B^2}{2\mu_0} \right] = -\nabla \cdot \mathbf{q}, \quad (1.3)$$

onde u é o módulo da velocidade média do plasma, B , o módulo do vetor campo magnético, w , a medida da entalpia do plasma e \mathbf{q} , o vetor de fluxo de calor.

O sistema de equações composto pelas Equações 1.1, 1.2 e 1.3 é complementado pelas equações de Maxwell que trata dos campos elétricos e magnéticos:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (1.4)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}, \quad (1.5)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (1.6)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{1}{\epsilon_0} \rho, \quad (1.7)$$

onde μ_0 é a constante da permeabilidade magnética do vácuo e ϵ_0 a constante da permissividade do vácuo. A partir do sistema de equações, é possível fazer algumas simplificações, como considerar $\rho \cong 0$, devido ao conceito de quase neutralidade do plasma que não permite a formação de carga líquida, e desconsiderar o termo de corrente de deslocamento na Equação 1.5 porque a escala temporal é muito curta. Ainda assim, é necessário fazer algumas imposições para diminuir o número de incógnitas, como considerar o sistema em um estado adiabático. Através da combinação de todas essas equações, simplificações e imposições, é possível obter a Lei de Ohm generalizada (BAUMJOHANN et al., 1996).

$$\mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{B} = \eta \mathbf{j} + \frac{1}{ne} \mathbf{j} \times \mathbf{B} - \frac{1}{ne} \nabla \cdot P_e + \frac{m_e}{ne^2} \frac{\partial \mathbf{j}}{\partial t}, \quad (1.8)$$

onde η é a resistividade do plasma, P_e é o tensor de pressão anisotrópico dos elétrons, m_e é a massa dos elétrons e e a carga elementar dos elétrons.

A Equação 1.8 pode ser simplificada fazendo algumas considerações:

- Quando \mathbf{j} não varia com o tempo temos que $\frac{\partial \mathbf{j}}{\partial t} = 0$.
- Quando a frequência ciclotrônica dos elétrons é muito menor que a frequência de colisão entre os elétrons e os íons o termo de Hall, $\mathbf{j} \times \mathbf{B}$, pode ser

desconsiderado.

- Considerando-se a pressão dos elétrons isotrópica temos que $\nabla \cdot P_e = 0$.

Sendo a condutividade $\sigma = \frac{1}{\eta}$, podemos escrever a Lei de ohm na forma simplificada:

$$\mathbf{j} = \sigma (\mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{B}). \quad (1.9)$$

A partir das equações de Maxwell e da Lei de Ohm simplificada, é possível obter uma equação que demonstra o comportamento do campo magnético imerso no plasma, chamada de equação de indução magnética:

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{u} \times \mathbf{B}) + \eta_m \nabla^2 \mathbf{B}, \quad (1.10)$$

onde η_m é a viscosidade magnética tal que $\eta_m = 1/\mu_0\sigma_0$.

O termo $\nabla \times (\mathbf{u} \times \mathbf{B})$ da Equação 1.10 descreve a convecção magnética junto com o fluxo do plasma, e $\eta_m \nabla^2 \mathbf{B}$ descreve a difusão do campo magnético. A razão entre esses dois termos é conhecida como número magnético de Reynolds (R_m), variando de acordo com as características do plasma em questão.

Fazendo uma simples análise matemática, pode-se concluir que se o número magnético de Reynolds for muito menor que a unidade, ou seja, $R_m \ll 1$, o termo de difusão prevalece em relação ao termo de convecção, conseqüentemente, a variação temporal do campo magnético no interior do plasma é gerada pela difusão das linhas do campo magnético, como mostrado na seguinte equação:

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \eta_m \nabla^2 \mathbf{B}. \quad (1.11)$$

Entretanto, se $R_m \gg 1$, como é no caso de um plasma altamente condutor, o termo de convecção prevalecerá em relação ao termo de difusão, levando à conclusão que a variação temporal do campo magnético dependerá apenas da velocidade média das partículas do plasma imersas no campo magnético:

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{u} \times \mathbf{B}). \quad (1.12)$$

Considerando o comprimento característico sob o qual o campo magnético varia, L_B , na equação de difusão (Equação 1.11), é possível obter a solução da equação

diferencial:

$$B = B_0 e^{\frac{\pm t}{\tau_d}}, \quad (1.13)$$

onde τ_d é o tempo de difusão magnética, dado por:

$$\tau_d = \mu_0 \sigma L_B^2. \quad (1.14)$$

Quando o comprimento característico sob qual o campo magnético varia for muito grande, o decaimento do campo magnético é extremamente longo e a difusão será um processo ineficiente podendo ser inteiramente negligenciado. A convecção torna-se dominante na Lei de Ohm e o campo magnético move-se "congelado" ao fluxo do plasma do vento solar (TREUMANN; BAUMJOHANN, 1997).

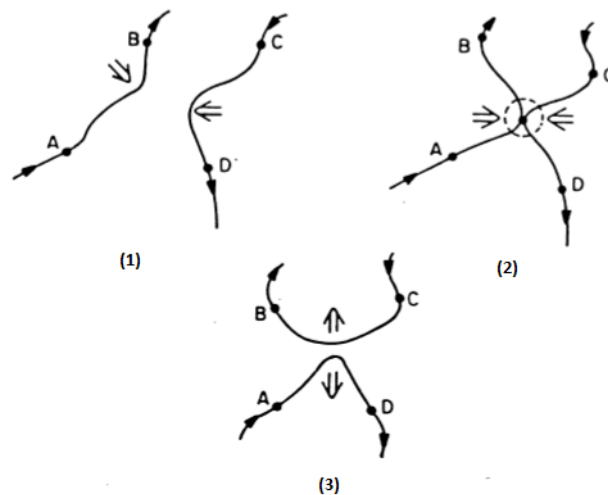
A Equação 1.12 mostra que em um plasma altamente condutor as linhas do campo magnético movem-se juntas com o plasma ao invés de difundir. A diferença de pressão entre a coroa solar e o espaço interplanetário é tão alta que consegue vencer a força gravitacional solar e expelir plasma altamente condutor para o espaço interplanetário. Esse plasma leva consigo as linhas do campo, fazendo com que o campo magnético interplanetário seja uma espécie de expansão do campo magnético solar.

O plasma do vento solar "congelado" ao campo magnético interplanetário segue pelo meio interplanetário e atinge a magnetosfera terrestre. Através do fenômeno de reconexão magnética, as partículas e energia do vento solar são transferidas para a magnetosfera. A reconexão ocorre devido à quebra do "congelamento" das linhas do campo do plasma, podendo ser definida como a reestruturação topológica dos campos magnéticos causada pela mudança da conectividade de suas linhas. Esse fenômeno é muito estudado na área de Geofísica Espacial, Física Solar e Astrofísica, principalmente através de simulação computacional. Os modelos utilizados nas simulações podem envolver tanto a teoria cinética de plasma, que estuda as interações de cada partícula com os campos eletromagnéticos, como um único fluido condutor, através do sistema magneto-hidrodinâmico (MHD).

Geralmente, a reconexão ocorre quando as linhas do campo magnético estão em sentidos opostos, permitindo a passagem do plasma através da fronteira da magnetopausa. Ao longo de todo o processo de reconexão magnética, o fluxo e topologia dos campos modificam-se, assim como ocorrem variações na velocidade das partículas e pressão onde ocorre a fusão das linhas do campo.

Para entender como ocorre essa reestruturação topológica das linhas do campo na reconexão, considere duas linhas de campo magnético com direção e sentidos aproximadamente antiparalelos (condição para acontecer o fenômeno de reconexão) sob o efeito de congelamento, como mostrado na Figura 1.2. As linhas aproximam-se em um determinado ponto (Painel 1). No Painel 2 pode-se considerar que o campo não está mais “congelado” ao plasma, ocasionando no rompimento de ambas as linhas. Quando há esse rompimento as linhas são reagrupadas (Painel 3), iniciando o fenômeno de reconexão, dando origem a novas linhas do campo que disparam numa direção perpendicular à direção pela qual as linhas se aproximaram no início do processo e em sentidos opostos. Partindo-se do princípio de que as linhas, quando reconectadas, disparam em sentidos opostos, podemos considerar o vetor velocidade das partículas envolvidas no processo um importante dado para identificar o fenômeno de reconexão na magnetopausa terrestre. Existem diversos

Figura 1.2 - Observa-se em (1) a aproximação das linhas, (2) o rompimento de ambas em um determinado ponto e (3) o surgimento de duas novas linhas com direção perpendicular em relação à direção em (1) e com sentidos opostos.



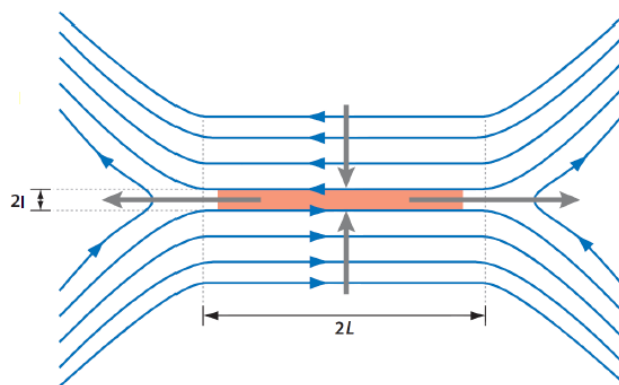
Fonte: (LAKHINA, 1992)

modelos teóricos que tentam explicar o processo físico da reconexão. Eles são baseados principalmente em observações e simulações numéricas. Dentre os mais

importantes modelos estão o de Sweet-Parker e o de Petschek.

O modelo de Sweet-Parker é baseado na conservação de massa, momento, energia e fluxo magnético para plasmas ideais entrando e saindo de uma região de difusão (local onde o processo de difusão do campo magnético se torna dominante). As dimensões dessa região possui comprimento $2L$ e espessura $2l$ que se estende ao longo da fronteira entre dois campos magnéticos antiparalelos, como pode ser observado na Figura 1.3. Nesse modelo, a reconexão magnética é mantida pelo balanço entre o fluxo de plasma que entra na região de difusão de largura $2l$ e o fluxo de plasma que sai ao longo da lâmina de corrente de comprimento $2L$ (TREUMANN; BAUMJOHANN, 1997).

Figura 1.3 - Esquema do mecanismo de reconexão magnética no modelo de Sweet-Parker.

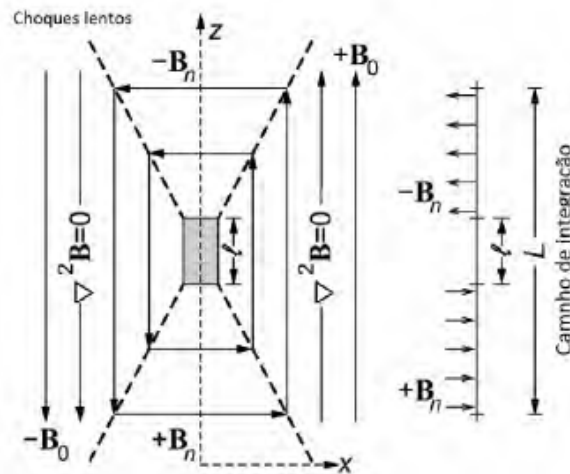


Fonte: (ZWEIBEL; YAMADA, 2009)

Esse modelo requer uma extensa camada de corrente e por isso o processo de reconexão é muito lento. Para resolver esse problema, Petschek apresentou em 1964 um novo mecanismo que tenta explicar como ocorre o processo de reconexão rápida, conhecido como mecanismo de Petschek. Nesse modelo, representado na Figura 1.4, Petschek propôs uma região de difusão bem menor que a proposta por Sweet-Parker, limitada por um pequeno comprimento l na fronteira entre os campos magnéticos de direções opostas (ao longo do eixo z), e quatro frentes de choque conectadas à região de difusão (localizadas nas linhas diagonais tracejadas da Figura 1.4). Essas ondas de choque mudam a direção do campo magnético causando uma rotação de 90 graus. Esse campo que sofreu rotação é o campo reconectado que deixa a região de difusão

e é conduzido pela força magnética (TREUMANN; BAUMJOHANN, 1997). Quando a região de difusão, que possui condutividade finita, é restrita a uma menor região do espaço o processo de reconexão se torna mais rápido, resolvendo o problema do modelo de Sweet-Parker.

Figura 1.4 - Esquema do mecanismo de reconexão magnética no modelo de Petschek.



Fonte: Adaptado de (TREUMANN; BAUMJOHANN, 1997)

1.3 Eventos de transferência de fluxo

O processo de reconexão magnética é caracterizado por variações espaciais e temporais. Os modos mais conhecidos que são dependentes do espaço e tempo, encontrados em dados observacionais, são a reconexão global/estacionária (GONZALEZ; MOZER, 1974) e a localizada/transiente (RUSSELL; ELPIC, 1978). Outras combinações entre esses modos de reconexão são possíveis. Em termos de ordens de grandeza, global significa ao longo de praticamente toda a magnetosfera diurna (dezenas de raios terrestres) e estacionária se refere a algumas horas, enquanto que localizada é estimada como aproximadamente 1 raio terrestre e transiente com duração de minutos.

A região ao longo do qual ocorre o processo de reconexão é caracterizada por campo magnético nulo. Essa região, que muitas vezes se estende por vários raios terrestres, pode ser entendida como um prolongamento de vários pontos de reconexão e é denominada linha-X (GONZALEZ; MOZER, 1974). Os modelos sugerem

a existência de uma única linha-X (SOUTHWOOD et al., 1988; SCHOLER, 1988) ou de múltiplas linhas (LEE; FU, 1985).

A reconexão magnética transiente gera estruturas magnéticas denominadas FTE (*flux transfer events*). Foram identificadas por (RUSSELL; ELPHIC, 1978) através de alterações nos dados do campo magnético do satélite ISEE.

1.3.1 O modelo de Russel e Elphic

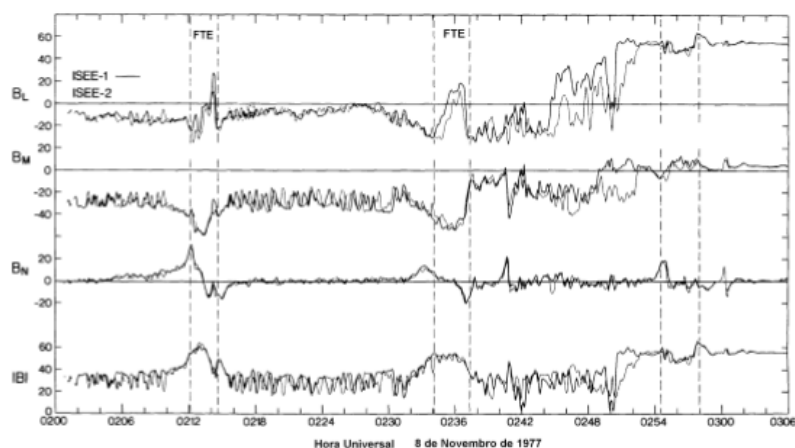
Russel e Elphic, em 1977, publicaram um artigo (RUSSELL; ELPHIC, 1978) que trazia os primeiros resultados obtidos pelos magnetômetros da missão ISEE-1 e -2 (*International Sun-Earth Explorer*). Esses resultados mostravam as medições das sondas, que estavam separadas por apenas umas centenas de quilômetros, em quatro diferentes passagens ao longo da magnetopausa. Durante os cruzamentos ao longo da magnetopausa, primeiramente o campo magnético da bainha estava na direção norte, em seguida para o sul com intensidade fraca, e nas duas passagens restantes o campo também estava para o sul porém com uma intensidade maior. Em seus resultados, Russel e Elphic optaram por um sistema de coordenadas⁴ normal à magnetopausa. O propósito de escolher esse sistema de coordenadas local em vez de um global era tornar os dados mais fáceis de serem interpretados.

Neste momento você deve estar se perguntando como conseguimos definir um sistema de coordenadas normal à magnetopausa sendo que a posição dela pode variar com a atividade geomagnética. De fato, existem algumas técnicas e modelos para fazer tal aproximação que dependem das circunstâncias particulares do cruzamento do satélite. Um dos modelos utilizadas por Russel e Elphic para construir tal sistema de coordenadas foi considerar uma geometria cônica com excentricidade 0.4 com foco na Terra (RUSSELL; ELPHIC, 1978). Outro modelo muito utilizado é o de mínima variância, que pode ser visto com mais detalhes nas referências (SONNERUP; CAHILL, 1967) e (SISCOE et al., 1968). É extremamente útil ressaltar a importância da definição desse sistema de coordenadas normal à magnetopausa pois um dos motivos atribuídos ao sucesso da identificação de eventos de transferência de fluxo no trabalho de Russel e Elphic foi justamente a utilização desse sistema de coordenadas.

⁴Composto por uma componente normal à magnetopausa, definido como \mathbf{n} , uma componente \mathbf{l} projetada no plano perpendicular à direção normal, e uma componente \mathbf{m} definida como $\mathbf{n} \times \mathbf{l}$, que completa o conjunto ortogonal.

Naquele tempo já era conhecido que configurações da magnetopausa mais estáveis ocorrem quando o campo magnetosférico e da bainha são paralelos um em relação ao outro (ou seja; o campo da bainha está predominantemente na direção norte), e menos estáveis quando tais campos são antiparalelos (campo da bainha predominantemente na direção sul). Em especial, um dos cruzamentos dos satélites no dia 8 de novembro de 1977 com o campo da bainha na direção sul despertou a atenção. A Figura 1.5 mostra os resultados obtidos pelos magnetômetros ISEE-1 e ISEE-2 para este cruzamento. Examinando apenas a componente do campo magnético na direção I , B_l , e a intensidade total do campo magnético $|B|$, pode-se observar que nos instantes 02:12 e 02:36 há uma entrada parcial das sondas na magnetosfera, pois o campo magnetosférico apresenta picos de valores de B_l positivos. Há também uma entrada completa na magnetosfera a partir do instante 02:44 pois os valores de B_l permanecem positivos. No entanto, os sinais de B_m e B_n despertam a atenção por apresentarem um comportamento peculiar: a componente B_m se intensifica nos instantes mencionados enquanto a componente B_n atinge picos positivos e, em seguida, decresce para picos negativos, voltando a aproximadamente zero. Além dos instantes mencionados, essas mesmas assinaturas da componente B_n aparecem aproximadamente em 02:41, 02:57 e 03:00. Russel e Elphic tentaram compreender

Figura 1.5 - Identificação dos FTEs encontrados por Russell e Elphic (1978) através de medidas de campo magnético realizadas pelos satélites ISEE-1 e -2 no cruzamento da magnetopausa em 8 de novembro de 1977. As regiões delimitadas pelas linhas verticais indicam a observação de FTEs.



Fonte: (RUSSELL; ELPHIC, 1978)

o comportamento peculiar de B_n e B_m , que foram detectados simultaneamente nas duas sondas - a coerência dos sinais demonstra que as sondas detectaram o mesmo evento. Com isso, sugeriram que o aumento característico de B_n para um pico positivo e depois a diminuição para um pico negativo é o que seria esperado se surgisse uma estrutura que viajasse ao longo da magnetopausa, passando pelas sondas.

Os autores atribuíram a formação dessa estrutura identificada na magnetopausa como uma consequência de um processo de reconexão magnética transiente e localizada, e denominaram essa estrutura como evento de transferência de fluxo (FTE). A estrutura da FTE foi caracterizada como um tubo de fluxo magnético, composto internamente por um campo helicoidal.

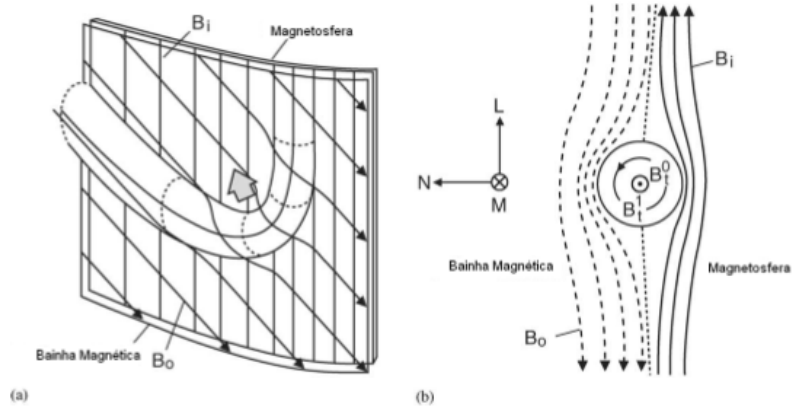
O processo de reconexão, responsável pela geração do FTE, reconecta as linhas do campo da bainha (linhas inclinadas na Figura 1.6) com as linhas do campo magnetosférico (linhas verticais na Figura 1.6), formando uma espécie de tubo de fluxo magnético. Esse tubo desloca-se ao longo da magnetopausa devido ao fluxo da bainha magnética e às forças de tensão magnética. Em razão de existir um campo helicoidal no interior do FTE, quando essa estrutura passa completamente pelo medidor de algum satélite (como o do ISSE-1 e -2), o instrumento detectará a mudança de direção do campo magnético (indo de valores positivos para negativos ou vice-versa - dependendo da direção em que o satélite percorre o tubo). A Figura 1.6 ilustra como são os tubos e como acontece a reconexão entre as linhas do campo magnetosférico e do campo da bainha.

1.3.2 Outros modelos teóricos

Sintetizando as principais conclusões feitas por Russel e Elphic, os eventos FTEs ocorrem quando acontece um processo de reconexão na magnetopausa, formando tubos de fluxo magnético que deformam as linhas do campo magnetosférico e do campo interplanetário, resultando no comportamento bipolar característico da componente do campo magnético normal à magnetopausa.

Esse modelo apresentado é apenas um dos diversos existentes que tentam explicar os eventos de transferência de fluxo. Existem três modelos bastante conhecidos e difundidos na literatura que tentam explicar o mecanismo de geração dos eventos FTEs observados à partir das primeiras medições feitas pela ISEE. O primeiro modelo, como já mencionado, foi proposto por Russel e Elphic e pode

Figura 1.6 - Modelo de Russel e Elphic para os FTEs. (a) Tubo de fluxo descrito por Russel e Elphic, formando um “cotovelo”. (b) Corte na seção transversal do tubo de fluxo mostrando a rotação do campo magnético responsável pela assinatura bipolar do campo.

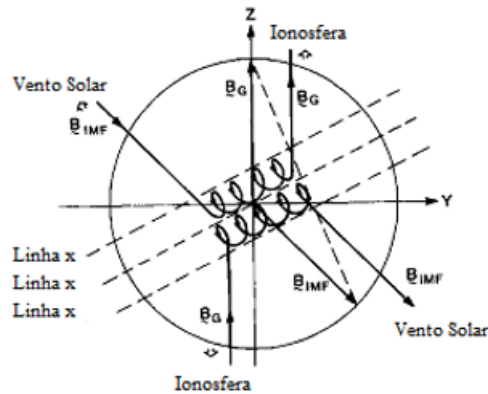


Fonte: (RUSSELL; ELPHIC, 1978) e (PASCHMANN et al., 1982a)

ser visto em mais detalhes nas referências (RUSSELL; ELPHIC, 1978) e (ELPHIC; RUSSELL, 1979). Ele é o mais simples e talvez o de maior importância para entender o conceito de um evento FTE, conseguindo explicar boa parte dos eventos que ocorrem na magnetopausa diurna.

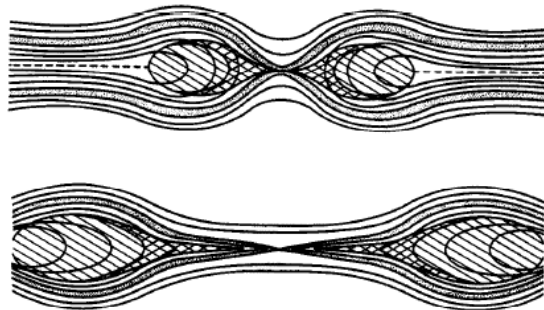
O segundo modelo foi proposto no trabalho de Lee e Fu (LEE; FU, 1985). Em síntese, esse modelo consiste na formação de tubos de fluxo magnético através de múltiplas linhas de reconexão. A Figura 1.7 retrata esse modelo, onde há três linhas de reconexão e a formação de dois tubos de fluxo que possuem campo magnético helicoidal. Esses tubos deslocam-se nas direções dos polos magnéticos devido à tensão magnética. Nesse modelo de múltiplas linhas de reconexão, a linha que origina os tubos tem uma longa extensão azimutal ao longa da magnetopausa e o número de tubos formados são iguais ao número de linhas de reconexão menos um. O terceiro modelo pertence a Southwood ?? e Scholer ??, que, independentemente, propuseram em 1988 um modelo baseado em uma única linha de reconexão, com a formação de dois tubos com longa extensão azimutal. Esses tubos são formados pelo acúmulo de linhas do campo magnético dando origem a protuberâncias, como pode ser observado na Figura 1.8. Com a propagação dos tubos formados (Figura 1.8), as linhas do campo reconectadas causam o comportamento bipolar da componente normal do campo.

Figura 1.7 - Modelo de FTE originado por múltiplas linhas X, proposto por Lee e Fu em 1985.



Fonte: (LEE; FU, 1985)

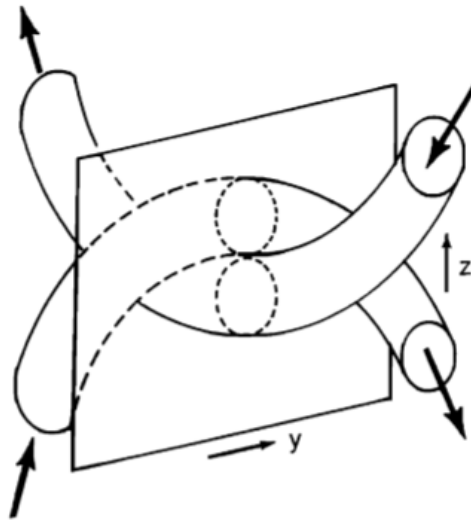
Figura 1.8 - Propagação dos tubos de fluxo na magnetopausa, proposto pelo modelo de Southwood.



Fonte: (SOUTHWOOD et al., 1988)

Estudos como (HESSE et al., 1990; LEE et al., 1993; OTTO, 1995; LOUARN et al., 2004; CARDOSO et al., 2013) descreveram tubos de fluxo interligados, que consistem em tubos de fluxo magnético “amarrados” entre si, como o da Figura 1.9. Em especial, o trabalho de Hesse (HESSE et al., 1990), através de uma simulação numérica, observou a formação de tubos parecidos com os descritos pelo modelo de Russel e Elphic, porém interligados e formados a partir de uma reconexão localizada na parte diurna da magnetosfera, como pode-se observar na Figura 1.9. Recentemente, Cardoso et.

Figura 1.9 - Representação dos tubos de fluxo interligados observados por Hesse, Birn e Schindler.



Fonte: (HESSE et al., 1990)

al (CARDOSO et al., 2013) utilizou uma simulação MHD 3-D processada pela NASA CCMC (*Community Coordinated Modeling Center*). Cardoso investigou a ocorrência de tubos de fluxo interligados, chegando à conclusão que o fenômeno observado correspondia aos modelos propostos por Russell e Elphic, pelo formato dos tubos de fluxo, e Lee e Fu, pelas múltiplas linhas de reconexão, concluindo ainda que os tubos interligados foram gerados por duas linhas de reconexão.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo geral o estudo da interação vento solar-magnetosfera e a análise de simulações magneto-hidrodinâmicas da parte diurna da magnetosfera terrestre utilizando a ferramenta da NASA CCMC (*Community Coordinated Modeling Center*).

2.2 Objetivos específicos

Como objetivo específico, este trabalho se propõe a:

- Identificar pontos de reconexão magnética ao longo do tempo através de dados de velocidade (V_z) e formação de protuberâncias na magnetopausa através de dados de pressão.
- Analisar diversos planos de visualização dos dados com o propósito de gerar uma análise em 3-D do evento.
- Identificar em uma região específica da magnetopausa terrestre um evento de transferência de fluxo.
- Comparar o resultado obtido das simulações com outros estudos teóricos existentes.

3 METODOLOGIA

Para a realização deste trabalho foi utilizado uma simulação 3-D processada pela NASA CCMC (*Community Coordinated Modeling Center*). Essa simulação baseia-se na teoria magneto-hidrodinâmica (MHD) cujo modelo de código usado foi o BATS-R-US (*Block-Adaptive-Tree-Solarwind-Roe-Upwind-Scheme*) desenvolvido pelo CSEM (*Center for Space Environment Modeling*) da Universidade de Michigan (POWELL et al., 1999; RIDLEY et al., 2003; TÓTH et al., 2005). O código resolve as equações ideais magneto-hidrodinâmicas (conservação de massa, momentum, energia, e as leis de Faraday) (KUZNETSOVA et al., 2007).

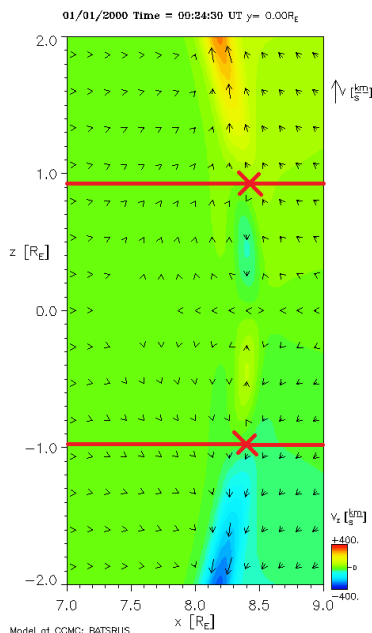
As condições iniciais de simulação são de 5.0 cm^{-3} para a densidade do vento solar e 600 km/s para a componente x da velocidade. O ângulo produzido em um plano vertical do vetor resultante das componentes B_y e B_z do campo magnético interplanetário é de 135 graus, sendo que o valor das componentes do campo magnético interplanetário são $B_y=+14 \text{ nT}$ e $B_z=-14\text{nT}$ (CARDOSO et al., 2013).

Para estudar as interações vento solar-magnetosfera terrestre foram utilizadas visualizações de dados de velocidade (V_z), pressão (P), campo magnético normal da magnetopausa (B_n) e topologias magnéticas.

Partindo-se do princípio que as linhas, quando reconectadas, disparam em sentidos opostos, podemos considerar o vetor velocidade das partículas envolvidas no processo um importante dado para identificar o fenômeno de reconexão na magnetopausa terrestre. Portanto, um dos parâmetros escolhidos para o estudo da reconexão foi a identificação de pontos onde a velocidade (V_z) estivesse, em relação à uma linha horizontal, com sentidos opostos ao norte e sul dessa linha, como mostrado na Figura 3.1.

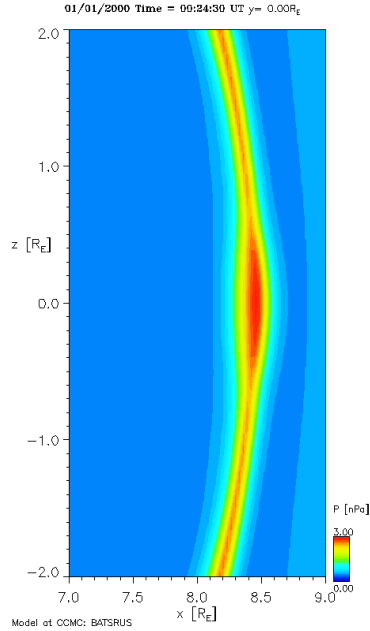
Em paralelo com a análise da velocidade (V_z), outro parâmetro considerado na metodologia deste trabalho foi a análise de protuberâncias na pressão da magnetopausa terrestre, como mostrada na Figura 3.2. Estudos como (SOUTHWOOD et al., 1988; DORELLI; BHATTACHARJEE, 2009; KU; SIBECK, 1997) mostraram a relação existente entre protuberâncias na pressão com eventos de transferência de fluxo. Elas são ocasionadas por uma mistura de plasmas de diferentes densidades e temperaturas originados da bainha magnética e da magnetosfera, resultando no aumento de pressão de plasma. Apesar de não indicar como a velocidade os pontos específicos de reconexão, protuberâncias na pressão indicam alguma anomalia na

Figura 3.1 - Visualização da velocidade (V_z) no instante 24:30. Observa-se dois pontos de reconexão baseados no parâmetro definido na metodologia deste trabalho. A partir de uma linha horizontal com origem no ponto candidato de reconexão, tem-se vetores velocidade com sentidos aproximadamente opostos ao redor da linha, caracterizando o processo (3) da Figura 1.2.



magnetopausa, sugerindo uma interação entre o vento solar e a magnetosfera terrestre, indicando uma possível ocorrência de um evento de transferência de fluxo. Com isso, neste trabalho a pressão será utilizada para indicar anomalias no campo da magnetopausa e possíveis eventos de transferência de fluxo. Após a análise do surgimento de protuberâncias na pressão da magnetopausa, temos fortes indícios que há um evento de transferência de fluxo ocorrendo próxima à região do aumento de pressão de plasma e do ponto de reconexão. (RUSSELL; ELPHIC, 1978; HAERENDEL et al., 1978) caracterizaram eventos de transferência de fluxo pela assinatura bipolar da componente normal do campo magnético da magnetopausa (B_n), esse parâmetro foi utilizado para a identificação de FTEs neste trabalho. A Figura 3.3 mostra a identificação dos FTEs encontrados por (RUSSELL; ELPHIC, 1978). O último parâmetro para o estudo da interação entre o vento solar e a magnetosfera terrestre foi a análise da topologia magnética da magnetopausa. A topologia magnética indica como as linhas de campo estão conectadas - fechadas, conectadas ao sul, conectadas ao norte ou abertas - possibilitando a identificação

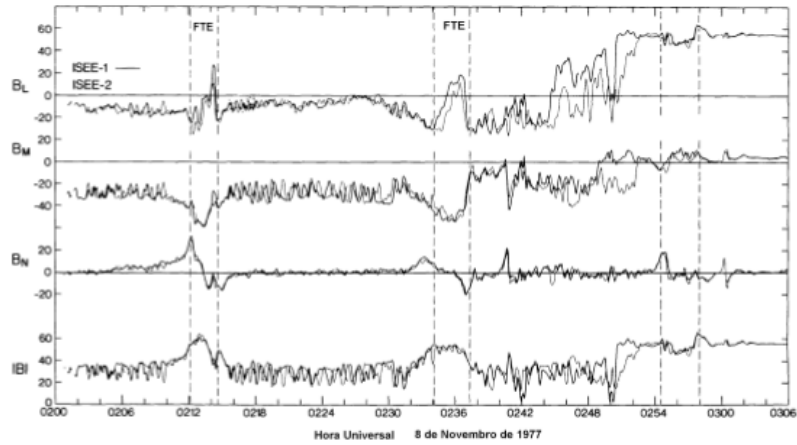
Figura 3.2 - Visualização da pressão (P) no instante 24:30. Pode-se observar uma protuberância surgindo na magnetopausa aproximadamente na altura $z=0$, na região subsolar.



e estudo da estrutura de tubos magnéticos. A Figura 3.4 mostra um exemplo da mudança da topologia magnética ao longo do tempo em planos xz com $y=0$.

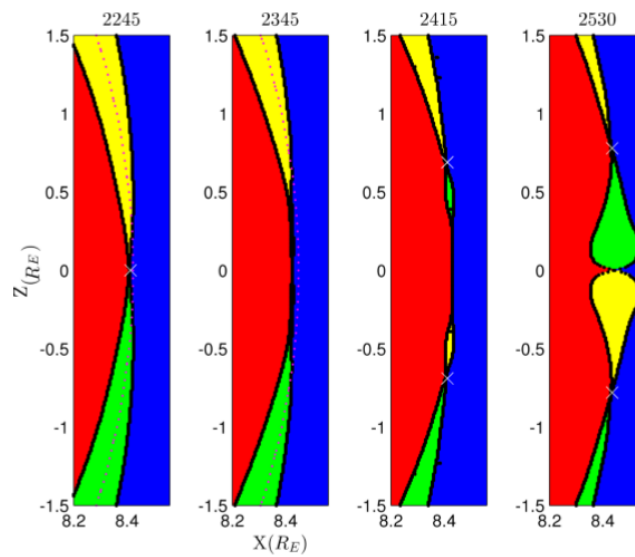
E por fim, o formato da magnetopausa, para compreendermos como suas oscilações podem afetar os dados obtidos, principalmente de campo magnético normal, foi estudado através de dados de densidade de corrente. A magnetopausa é caracterizada por possuir uma intensa densidade de corrente em sua fronteira. Identificando essa região mais externa que contém a maior densidade de corrente, podemos obter uma boa aproximação da localização da magnetopausa. Com isso, foi possível acompanhar a variação da distância da magnetopausa em relação ao centro da Terra durante todo o evento analisado.

Figura 3.3 - Identificação dos FTEs encontrados por Russell e Elphic (1978) através de medidas de campo magnético realizadas pelos satélites ISEE-1 e -2 no cruzamento da magnetopausa em 8 de novembro de 1977. As linhas verticais indicam a observação de FTEs.



Fonte: Adaptado de (RUSSELL; ELPHIC, 1978)

Figura 3.4 - Mudança da topologia magnética em $y=0$ para diferentes tempos. A cor vermelha são linhas fechadas, amarelo conectadas ao norte, verde conectadas ao sul e azul conectadas com o campo interplanetário. Fonte: Pérez (2014).



4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Através da análise da pressão na magnetopausa ao longo do tempo, como mostrado na Figura 4.1, foi identificado o surgimento de uma protuberância no instante 31:30. Essa estrutura foi observada propagando-se para o norte em planos xz entre $y=-2 R_t$ e $y=2 R_t$. É possível observar a região de intensa pressão (cor vermelha) em todos os planos x-z para o instante 31:30 da Figura 4.2, o que indica que a estrutura se estende no mínimo de -1 a 2 R_t na direção y. Esse mesmo comportamento foi observado entre os instantes 31:00 e 33:00, em planos entre $y=-2 R_t$ e $y=2 R_t$.

Com o surgimento da protuberância na pressão da magnetopausa, foi levantada a hipótese que existia um evento de transferência de fluxo perto da região analisada, e essa perturbação no campo estava propagando-se para o norte. Como a identificação de um FTE é dada através do comportamento bipolar da componente normal do campo, é necessário um sistema de coordenadas normal à magnetopausa, definida como \mathbf{n} , uma componente \mathbf{l} , projetada no plano perpendicular à direção normal, e uma componente \mathbf{m} definida por $\mathbf{n} \times \mathbf{l}$, que completa o conjunto ortogonal. Porém, a simulação utilizada retorna dados vetoriais baseando-se no sistema de coordenadas cartesianos, com componentes \mathbf{x} , \mathbf{y} e \mathbf{z} . Visto isso, o ponto subsolar com $x=8,5 R_t$, $y=0 R_t$ e $z=0 R_t$, mostrou-se o mais apropriado para a análise da componente normal do campo, pois é o único ponto em que o vetor \mathbf{B}_x é igual ao vetor \mathbf{B}_n .

Figura 4.1 - Gráfico da pressão ao longo do tempo no plano de corte $y=0.00$ do instante 31:00 até 32:30.

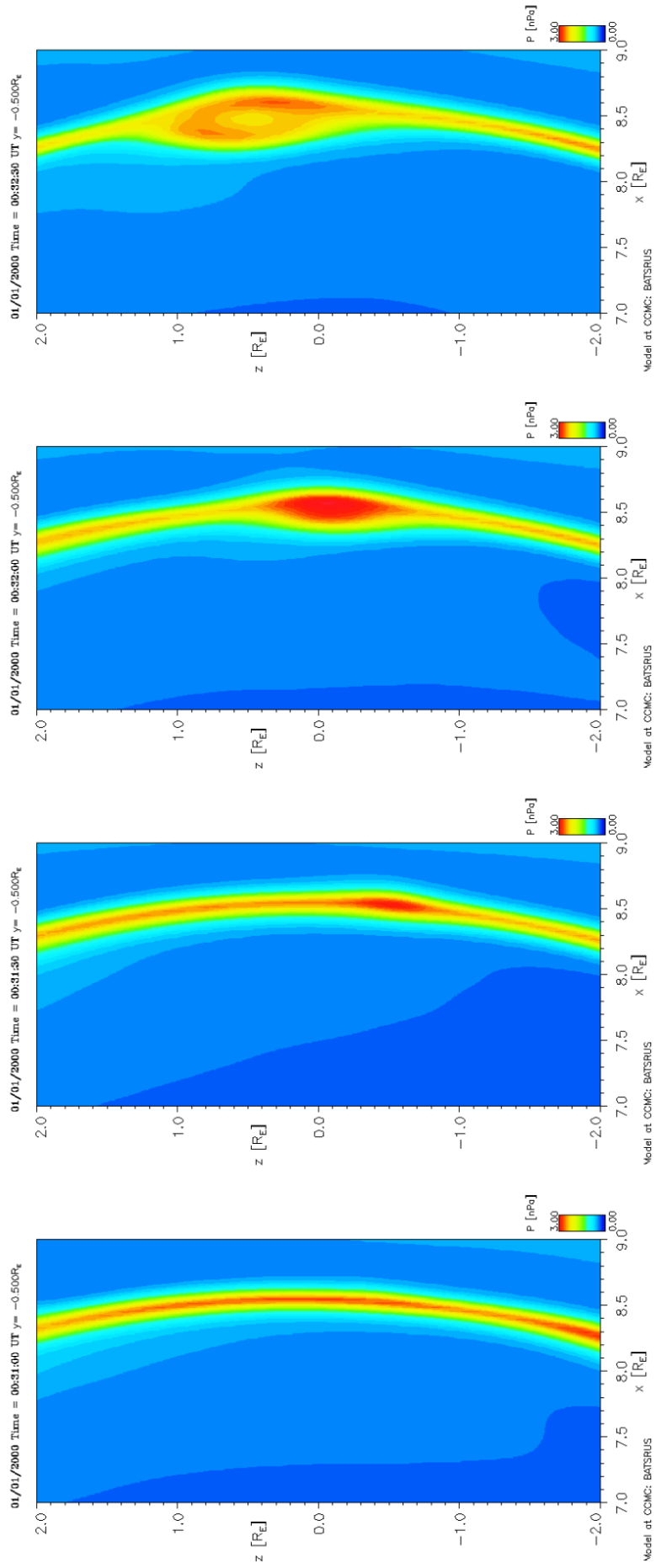
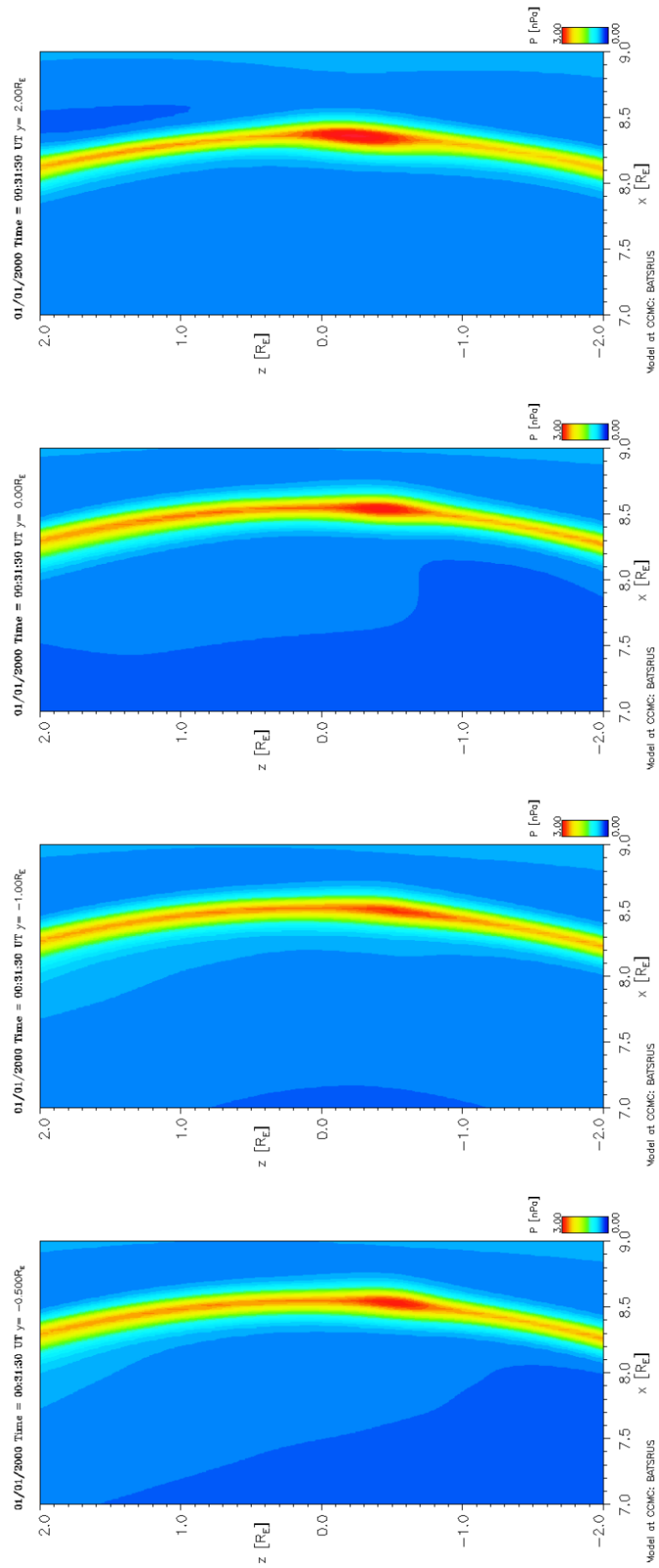
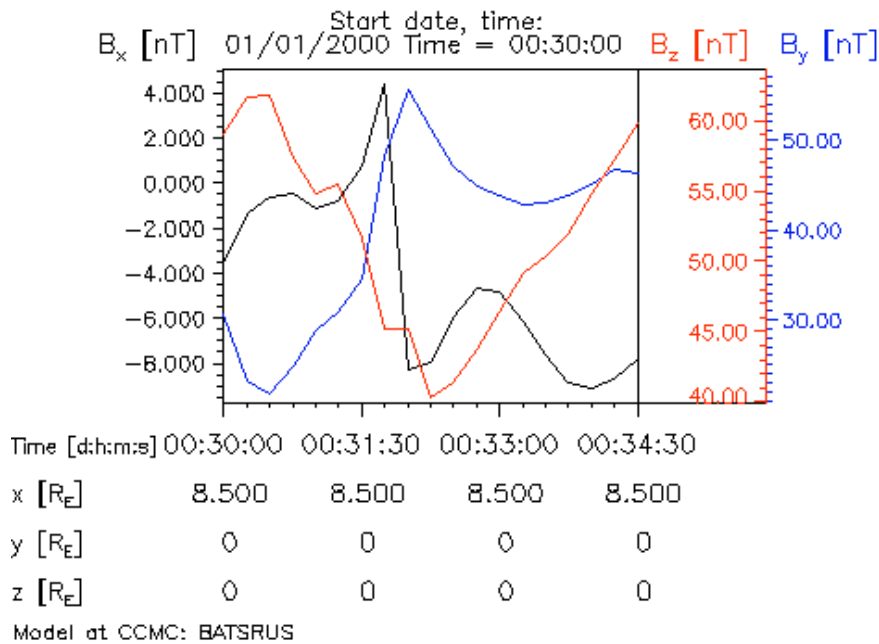


Figura 4.2 - Gráfico da pressão no instante 31:30 nos planos de corte $y=-1$, $y=-0.5$, $y=0$ e $y=2$.



Utilizando um satélite virtual, foram obtidas as componentes x do campo magnético (B_x) e as outras duas componentes (B_y e B_z) com duração de 4 minutos e 30 segundos no ponto subsolar, do instante 30:00 até o instante 34:30. Os dados das séries temporal das componentes do campo magnético, contidos na Figura 4.3, mostram o sinal de um FTE com polaridade direta e assimétrico (DING et al., 1991), indo de valores negativos de B_x para valores positivos, atingindo um pico de aproximadamente 4 nT, e depois voltando para valores negativos, atingindo um pico de aproximadamente -8 nT. A componente B_x começa a aumentar no instante 31:00 e volta aproximadamente ao valor inicial no instante 32:45, totalizando a duração do evento em 2 minutos e 45 segundos.

Figura 4.3 - Gráfico da componente B_x , B_y e B_z fixado no ponto subsolar (8.5,0,0) ao longo dos instantes 30:00 e 34:30.



Com o intuito de descobrir se essa perturbação no campo da magnetopausa foi provocada por uma reconexão magnética e quais eram as características dessa reconexão, foi realizada uma análise da velocidade (V_z) em planos xz entre $y=-2 R_t$ e $y=2 R_t$, na mesma região utilizada para os dados de pressão,

entre os instantes 30:00 e 33:00. Para uma melhor comparação da velocidade (V_z) entre os planos gerados, foi feito um levantamento das velocidades (V_z) máximas e mínimas de cada plano em cada instante, e depois a maior e menor velocidade (V_z) entre todos os dados foi escolhida como limites para gerar as figuras.

A Figura 4.4 apresenta os dados da velocidade (V_z) em diferentes planos xz no instante 30:30, antes do início do FTE. Através dos dados foi notado que há um único ponto de reconexão em todos os planos de corte gerados, sugerindo que a reconexão está acontecendo em uma única linha X ao longo da magnetopausa ocasionando uma perturbação no campo.

As Figuras 4.5 e 4.6 apresentam os dados da velocidade (V_z) no instante 31:00 (início do FTE) e 31:30 (durante o FTE), respectivamente. Assim como na Figura 4.4, os dados indicam que está ocorrendo um único ponto de reconexão em todos os planos xz analisados. Este padrão foi observado durante toda a ocorrência do FTE.

Figura 4.4 - Gráfico da velocidade da velocidade no instante 30:30, antes do FTE, nos planos de corte $y=-2$, $y=-1$, $y=0$ e $y=1$ e $y=2$

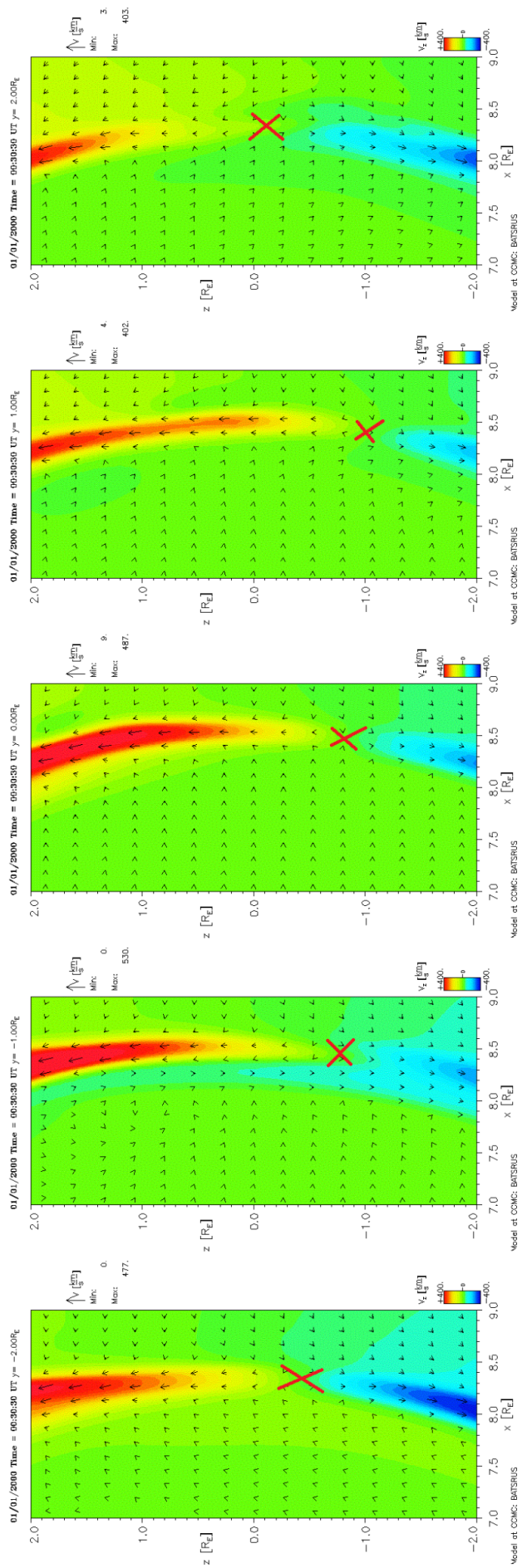


Figura 4.5 - Gráfico da velocidade no instante 31.00, no início do FTE, nos planos de corte $y=-1.5$, $y=-0.5$, $y=0$ e $y=0.5$ e $y=1.5$

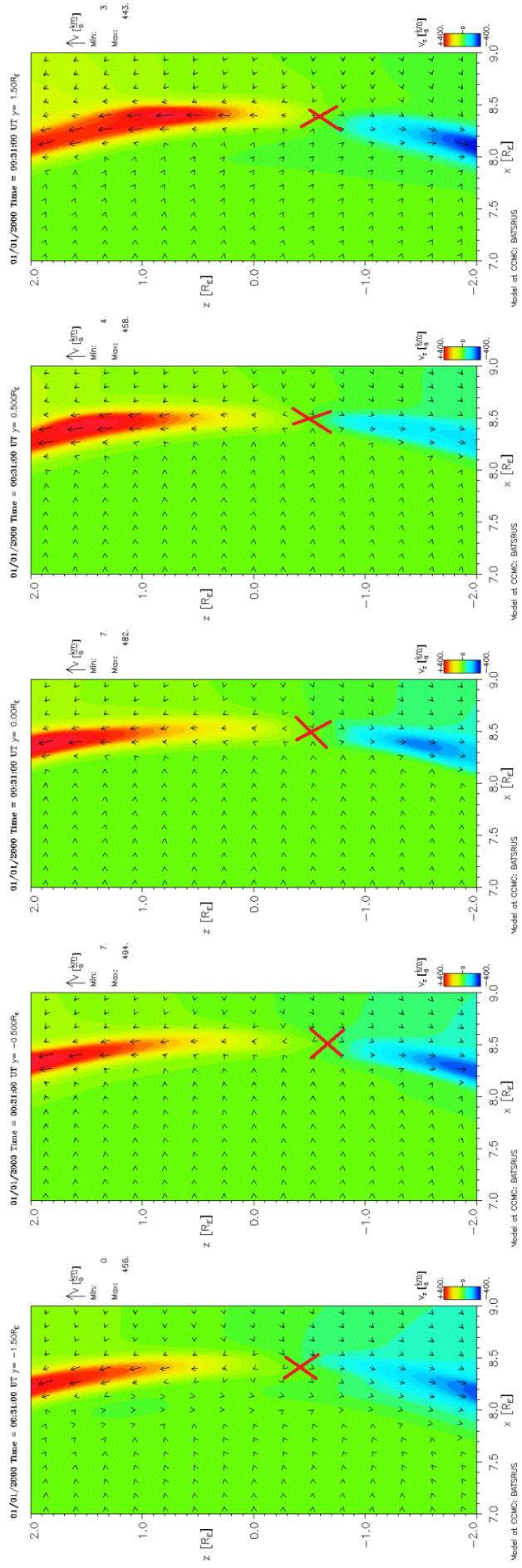
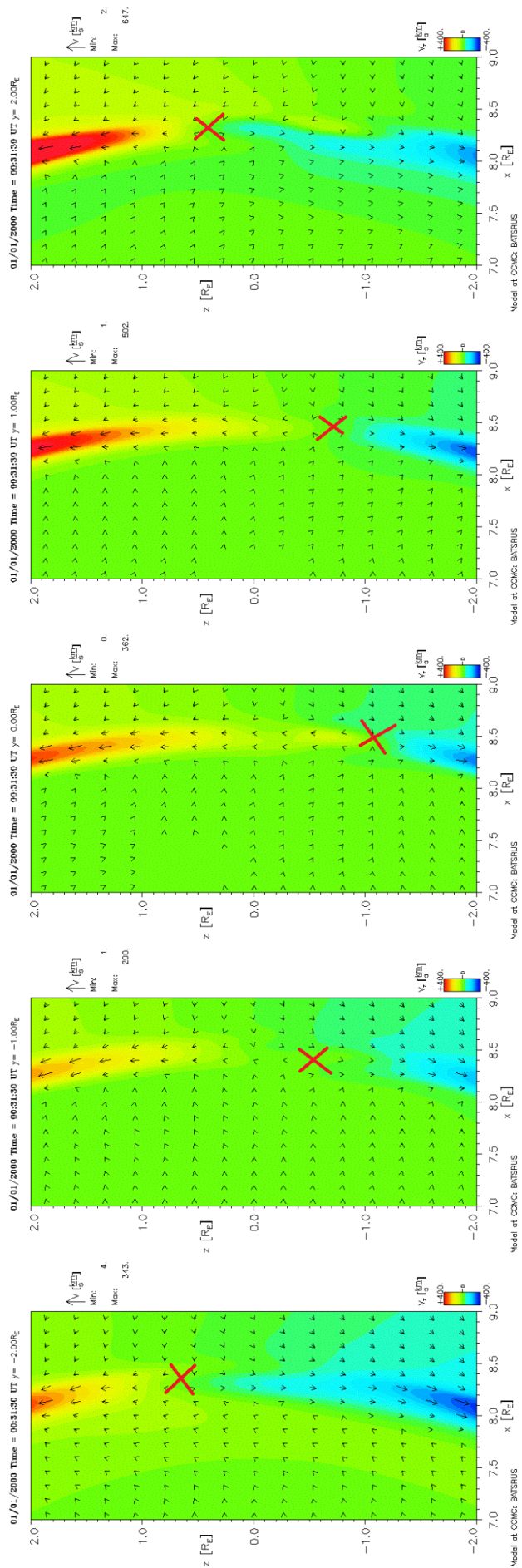
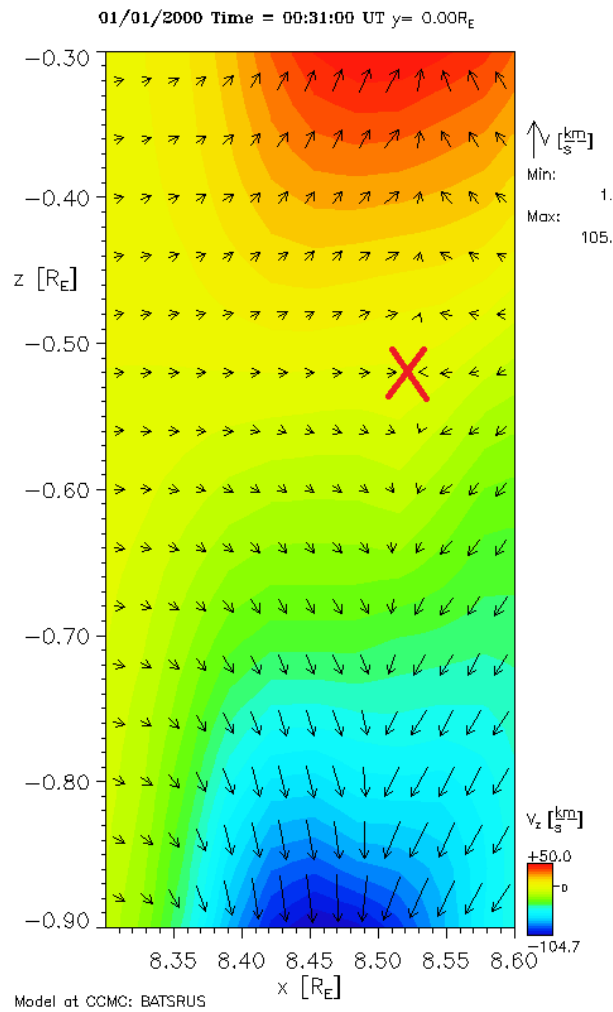


Figura 4.6 - Gráfico da velocidade no instante 31:30, durante o FTE, nos planos de corte $y=-2$, $y=-1$, $y=0$ e $y=1$ e $y=2$.



O único ponto de reconexão em todos os planos xz observados foram confirmados analisando uma região bem próxima dos pontos e sem o truncamento das velocidades máximas e mínimas. Na Figura 4.7 podemos ver precisamente onde acontece a reconexão no instante 31:00 em $y=0$ Rt. Foi possível identificar esse único ponto de reconexão em todos os planos analisados durante todo o período do FTE. O com-

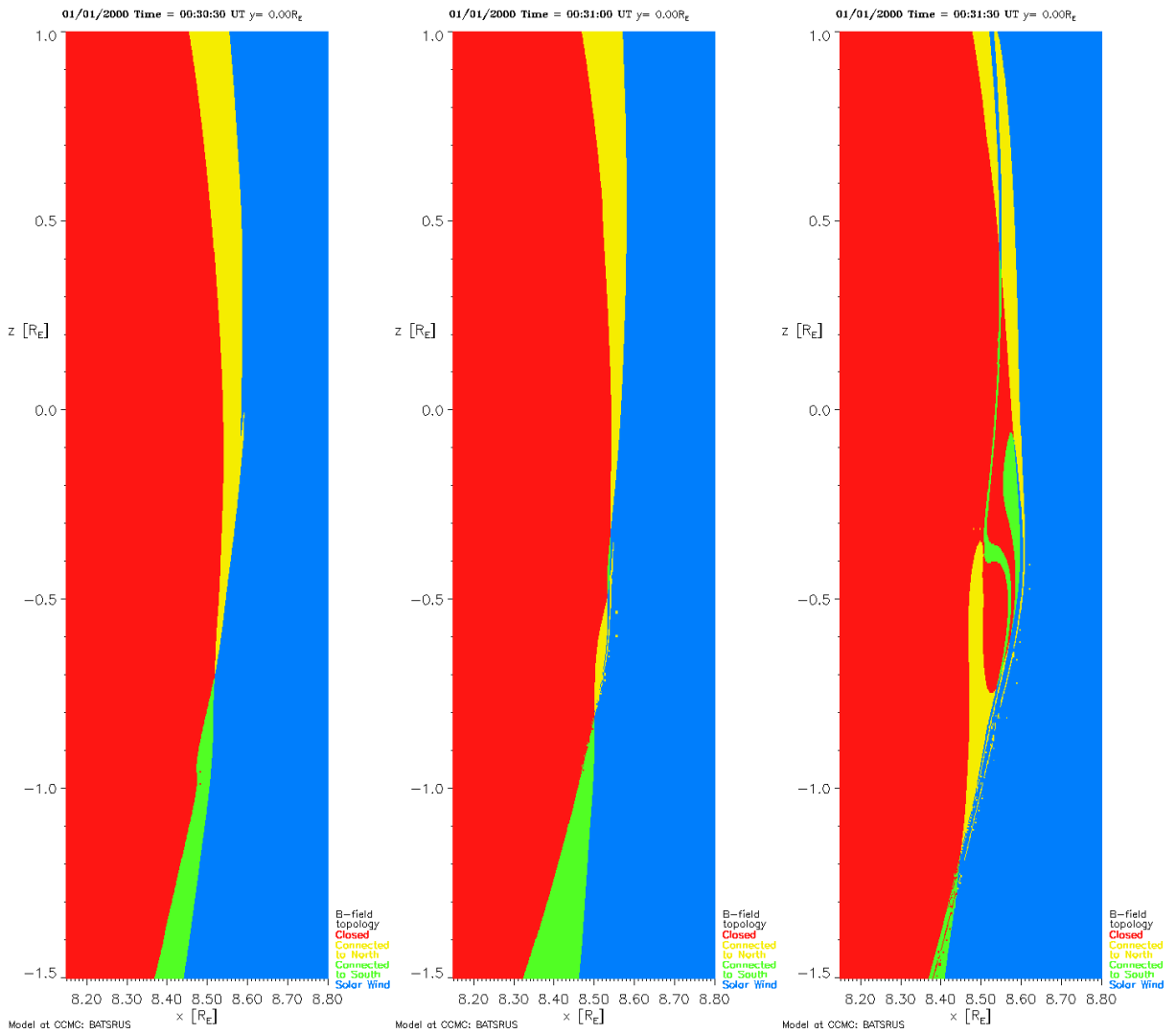
Figura 4.7 - Gráfico da velocidade no instante 31:00 em $y=0$. A marca em vermelho indica exatamente a localização do ponto de reconexão.



portamento bipolar da componente normal à magnetopausa durante um evento de transferência de fluxo é geralmente explicada pela formação de tubos de fluxo magnético. Com isso, foram coletados dados de topologia magnética durante o período

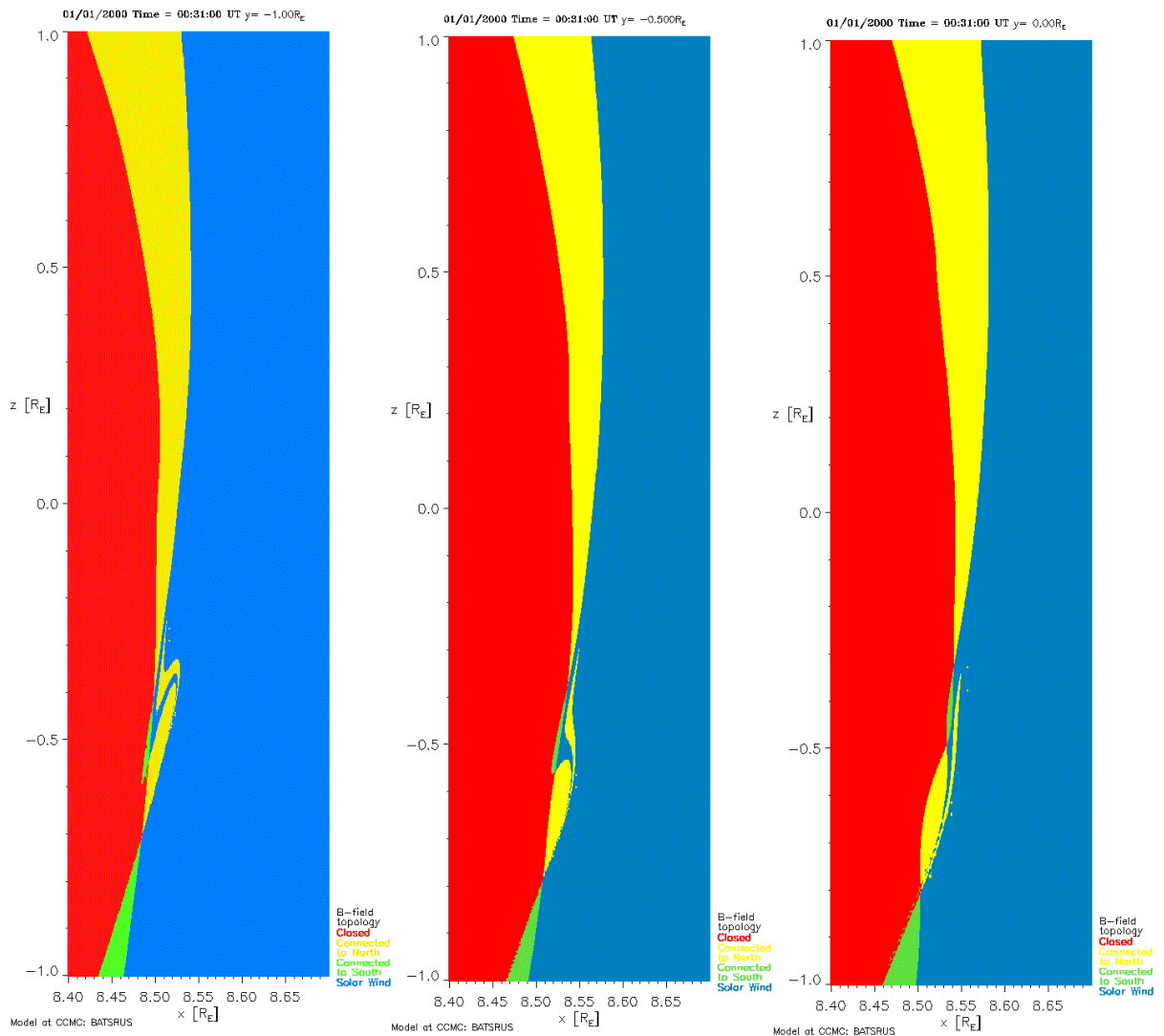
de 30:30 e 32:45. A Figura 4.8 mostra a topologia magnética da magnetopausa em planos xz com $y=0$ Rt em três instantes de tempo diferentes; 30:30 (antes da geração do FTE), 31:00 (início do FTE) e 31:30 (durante o FTE). Foi observada a formação de dois tubos de fluxo no hemisfério sul no instante 31:00, um com linhas conectadas ao sul (tubo verde), e o outro com linhas conectadas ao norte (tubo amarelo). Esses tubos propagam-se no instante 31:30 aumentando a complexidade de suas topologias.

Figura 4.8 - Topologia magnética da magnetopausa em planos xz com $y=0$ Rt nos instantes 30:30, 31:00 e 31:30.



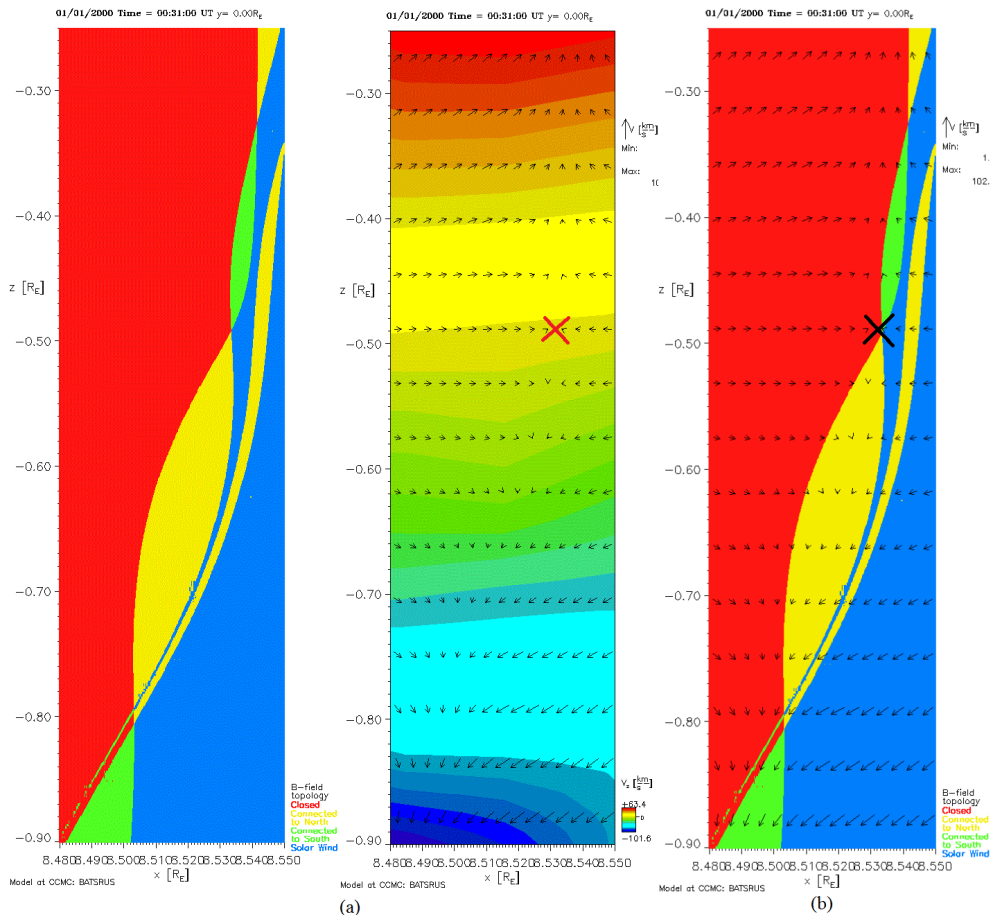
A Figura 4.9 mostra a topologia magnética da magnetopausa no instante 31:00 referente à formação dos tubos de fluxo em diferentes planos xz. Foi observado que os dois tubos de fluxo aparecem nos planos $y=-1 R_t$, $y=-0.5 R_t$ e $y=0 R_t$. Com esse três planos dispostos, observa-se a forma dos tubos em três dimensões.

Figura 4.9 - Topologia magnética da magnetopausa em planos xz com $y=-1 R_t$, $y=-0.5$ e $y=0$ no instante 31:00.



A Figura 4.10 mostra a relação da reconexão com a formação dos tubos. Em (a) temos a topologia magnética dos tubos no instante 31:00 no plano xz em $y=0$ Rt ao lado dos dados de velocidade na mesma região e instante de tempo. Em (b) temos a sobreposição da topologia magnética com o vetor velocidade, observando-se que o ponto de reconexão coincide com a separação dos tubos. Em todos os planos em que os tubos eram relativamente de fácil identificação foi observado que os pontos de reconexão ficavam próximos das regiões que separavam os dois tubos de fluxo.

Figura 4.10 - (a) Comparativo entre a topologia magnética e a velocidade nos instante 31:00 em $y=0$ Rt. (b) Sobreposição da topologia magnética com a velocidade nos instantes 31:00 em $y=0$ Rt.



Através da análise da topologia das Figuras 4.8, 4.9 e 4.10, a estrutura formada, identificada como dois tubos de fluxo, parecem ser tubos de fluxo interligados. A

topologia sugere que os dois tubos contém um lado conectado com a Terra e o outro com o campo magnético interplanetário. O tubo verde está conectado com o hemisfério sul, porém está a cima do tubo amarelo que por sua vez está conectado com o hemisfério norte, sugerindo a configuração de tubos interligados. Nossos resultados da topologia conferem com a topologia obtida no trabalho de (HESSE et al., 1990) que apresentaram uma análise topológica de um modelo de campo magnético simples onde uma perturbação localizada na magnetopausa provocou um evento de transferência de fluxo. A Figura 1.9 mostra a estrutura dos tubos de fluxo proposta por (HESSE et al., 1990), apresentando o mesmo corte transversal em y nos tubos analisados neste trabalho.

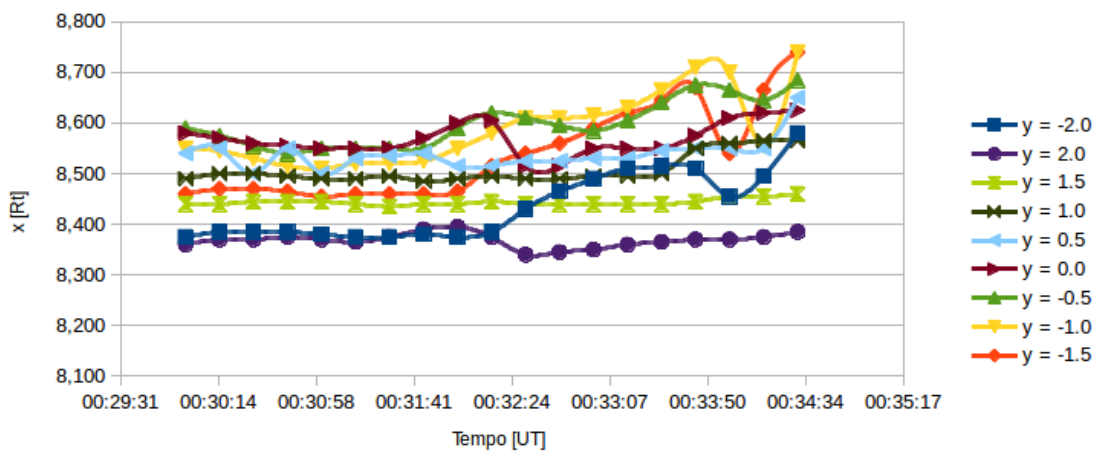
Tubos de fluxo magnético possuem no seu interior linhas de campo helicoidais ou paralelas. Vamos considerar um satélite virtual estacionário, que fará medidas do campo magnético no ponto subsolar da magnetopausa em duas situações distintas. Na primeira situação considere uma seção de um tubo de fluxo com campo rotacionando em sentido horário em seu interior, passando pelo satélite no sentido sul-norte. Observa-se que com a passagem do tubo pelo satélite, o campo normal irá mudar de sentido, e o sinal coletado pelo satélite terá a forma bipolar característica de um FTE. Na segunda situação, considere a seção transversal de dois tubos próximos, com linhas de campo paralelas em seus interiores ao longo de seus comprimentos, de forma que a projeção do campo em um eixo normal à magnetopausa nos dois tubos resultem em sentidos opostos. Observa-se que quando os dois tubos passarem pelo satélite no sentido sul-norte, o sinal observado será de um FTE. Isso explica o sinal bipolar do campo normal da estrutura magnética observada neste trabalho, gerado pela passagem de dois tubos com campos magnéticos de diferentes orientações no ponto subsolar. A reconexão magnética gerou tubos de fluxo no hemisfério sul, que inicialmente estão interligados, propagando-se para o norte e aumentando a complexidade de suas topologias, dificultando análise de suas estruturas.

As topologias magnéticas confirmam que o evento gerado pela reconexão magnética é consequência da formação de tubos de fluxo magnético. Por outro lado, a ferramenta da *NASA CCMC* não nos permite com eficiência seguir os tubos com o satélite virtual para analisar a estrutura interna deles, e seu impacto na configuração do campo magnético da magnetopausa e magnetosfera diurna. Sabemos que esses tubos perturbam a magnetosfera, e podem como consequência, modificar a distância da magnetopausa em relação ao centro da Terra, fazendo ela se “expandir” ou

“contrair” devido à variação de energia no interior da magnetosfera. Como a análise do campo magnético normal da magnetopausa foi realizada em um ponto muito próximo à fronteira da magnetopausa, essa variação de distância pode ter influenciado diretamente nossa primeira análise da variação bipolar do campo magnético normal - a qual nos fez levantar a hipótese da ocorrência de tubos de fluxo magnético.

Visto isso, para analisar a variação da distância da magnetopausa em relação ao centro da Terra durante o evento, foi feita uma análise da densidade de corrente em uma região próxima ao ponto subsolar entre os instantes 30:00 e 34:30. A magnetopausa é conhecida por apresentar uma intensa densidade de corrente em sua fronteira. Por isso, considerar a posição da magnetopausa coincidente com o do ponto de máxima densidade de corrente mais externa da região próxima à fronteira, é uma boa aproximação, como discutido na Seção 3. Através da análise da densidade de corrente na magnetopausa ao longo do tempo em diferentes planos xz, entre $y=-2 R_t$ e $y=2 R_t$, foi possível identificar o ponto mais externo em x na altura $z=0,0 R_t$, de máxima densidade de corrente. Após identificar todos os pontos de máxima densidade de corrente, como descrito, foram construídos diversos gráficos para analisar qualitativamente os resultados. A Figura 4.11 mostra o conjunto de todos os dados coletados ao longo dos instantes 30:00 e 34:30, com intervalos de 00:15. Ao todo, são 19 pontos para cada plano de corte. Podemos notar, em

Figura 4.11 - Distância da magnetopausa em $z=0,0 R_t$ para diferentes planos de corte xz entre $y=-2 R_t$ e $y=2R_t$ em função do tempo (30:00 à 34:30 UT).



primeira mão, que os planos xz negativos ($y < 0$) são os que sofrem maior variação da distância da magnetopausa. Para avaliar melhor essa diferença da variação da distância da magnetopausa entre planos com $y > 0$ e $y < 0$, podemos analisar as Figuras 4.12 e 4.13.

Figura 4.12 - Distância da magnetopausa em $z=0,0 R_t$ para diferentes planos xz com $y \leq 0 R_t$ em função do tempo (30:00 à 34:30 UT).

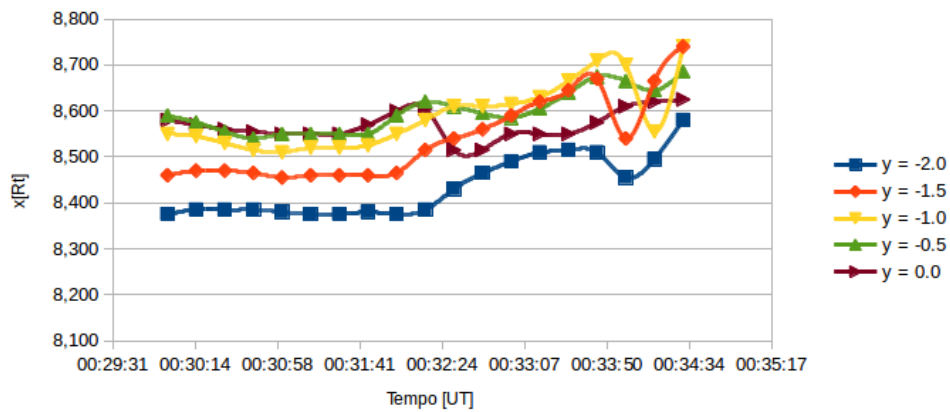
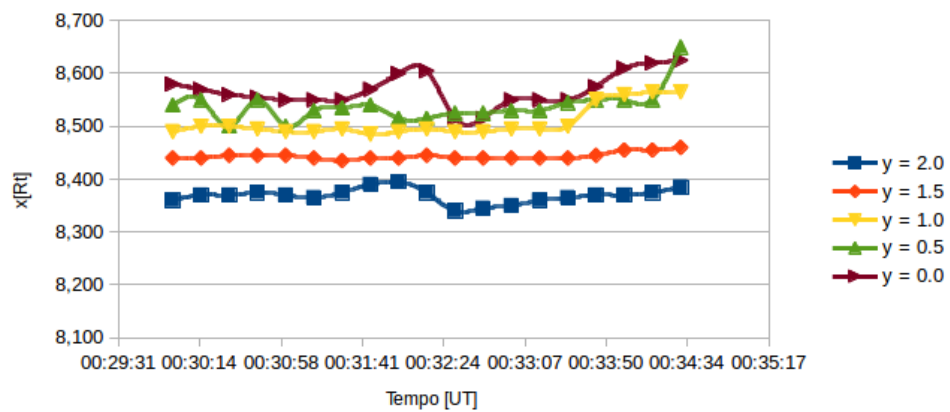


Figura 4.13 - Distância da magnetopausa em $z=0,0 R_t$ para diferentes planos xz com $y \geq 0 R_t$ em função do tempo (30:00 à 34:30 UT).

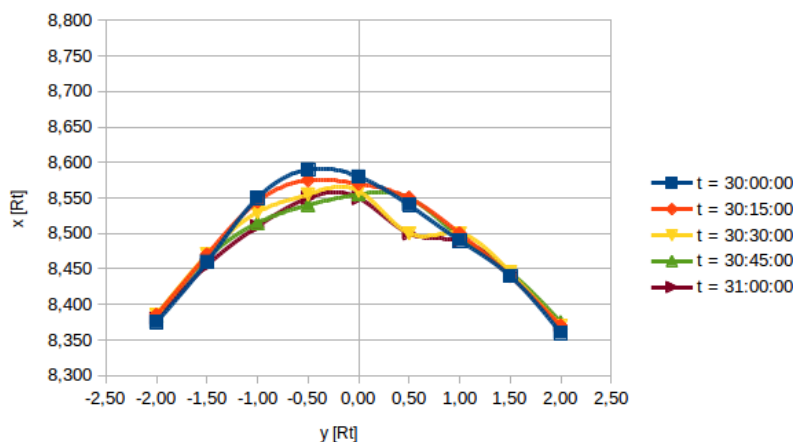


A Figura 4.12 mostra a distância da magnetopausa em $z = 0,0 Rt$ para planos xz com $y \leq 0 Rt$, para instantes entre 30:00 e 34:30. Podemos notar que a distância permanece constante em todos os planos até aproximadamente o instante 31:00, quando as primeiras variações consideráveis começam a ocorrer. Esse instante corresponde ao início da reconexão magnética observada através da velocidade e o início do evento FTE observado através do campo magnético e topologia. Durante o evento, a distância da magnetopausa nos planos analisados aumenta ao longo do tempo, com excessão do plano $y = 0,0 Rt$, o qual, aproximadamente no instante 32:15, começa a contrair-se até o instante 32:45. A partir do instante 32:45, a distância da magnetopausa começa a ter variações intensas e bruscas, evidenciando que algum evento está provocando a perturbação no regime de energia da magnetosfera.

A Figura 4.13 mostra a distância da magnetopausa em $z = 0,0 Rt$ para planos xz com $y \geq 0 Rt$, também para instantes entre 30:00 e 34:30. Podemos notar que a distância permanece constante em todos os planos em praticamente todo o tempo analisado. Para $y \geq 0$ não há variações na distância da magnetopausa maiores que $0,1Rt$. Portanto, podemos dizer que os dados da Figura 4.13 nos revela que não há variações relevantes na distância da magnetopausa para $y > 0$ durante e após o evento FTE identificado.

Pode-se obter uma boa visualização do formato da magnetopausa com os mesmos dados de densidade de corrente montando um gráfico de $x[Rt]$ em função de $y[Rt]$. Como todos os dados são referentes à $z = 0,0 Rt$, as Figuras 4.14, 4.15 e 4.16 representam o formato da magnetopausa para esse plano xy . A Figura 4.14 contém os dados do instante 30:00:00 até 31:00:00, ou seja, antes da formação dos tubos de fluxo e no instante exato da identificação deles através da topologia magnética (31:00:00). A magnetopausa nesse intervalo de tempo parece estar se “comprimindo”, com variações principalmente em $y = -1,00$, $y = -0,50$, $y = 0,00$ e $y = 0,50$. Essas pequenas variações no formato (menos de $0,05$ raios terrestres) são usuais, e inconclusivas em relação à influência direta do surgimento dos tubos de fluxo nas oscilações detectadas no formato da magnetopausa. Por outro lado, o fato da magnetopausa estar comprimindo-se confere com o fato de que, no processo de reconexão, que inicia-se aproximadamente no instante 30:30, as linhas de campo magnético reconectam-se e, conseqüentemente, a magnetopausa tende a diminuir o seu tamanho.

Figura 4.14 - Formato da magnetopausa em $z=0,0 R_t$ entre os instantes de tempo 30:00:00 e 31:00:00 UT.



A Figura 4.15 contém os dados do instante 31:00:00 até 32:00:00. Nesse intervalo de tempo, os tubos começam a se propagar e a complexidade da topologia magnética aumenta consideravelmente. Podemos notar pelo gráfico que a magnetopausa começa a se “expandir”, principalmente entre $y = -1,00$ e $y = 0,00$. Uma possível explicação para essa expansão da magnetopausa é uma entrada de energia pelo lado noturno da magnetosfera, que tenta equilibrar o seu balanço interno de energia. Para tirar conclusões mais consistentes sobre a expansão da magnetopausa, é necessário uma análise mais consistente do processo de reconexão na cauda magnetosférica para quantificar a entrada de energia no regime magnetosférico.

A Figura 4.16 contém os dados do instante 32:00:00 até 33:00:00. Nesse intervalo de tempo, o formato da magnetopausa parece ser estável para $y > 0,00$, e apresenta uma grande variação para $y \leq 0,00$, como foi constatado na Figura 4.13. Para valores negativos de y , a magnetopausa continua se expandindo, chegando a valores maiores que $x = 8,60 R_t$, com excessão em $y = 0,00$, onde a magnetopausa se contrai ao longo do tempo até o instante 32:45:00, expandindo-se novamente no instante 33:00:00. Através das Figuras 4.14, 4.15 e 4.16 observa-se que a magnetopausa em $y = 0,00 R_t$ nunca passa de distâncias inferiores a $x = 8,50 R_t$. Isso nos permite concluir que o sinal bipolar do campo magnético no ponto subsolar, identificado na Figura 4.3, não é provocado por uma variação no formato da magnetopausa. O satélite virtual utilizado para detectar o sinal bipolar, permanece fixo no ponto subsolar do instante 30:00:00 até 34:30:00. Logo, como a fronteira da

magentopausa, durante a identificação do FTE, não passa pelo satélite virtual, o sinal do FTE é exclusivamente ocasionado pelo regime do campo magnetosférico.

Figura 4.15 - Formato da magnetopausa em $z=0,0 R_t$ entre os instantes de tempo 31:00:00 e 32:00:00 UT.

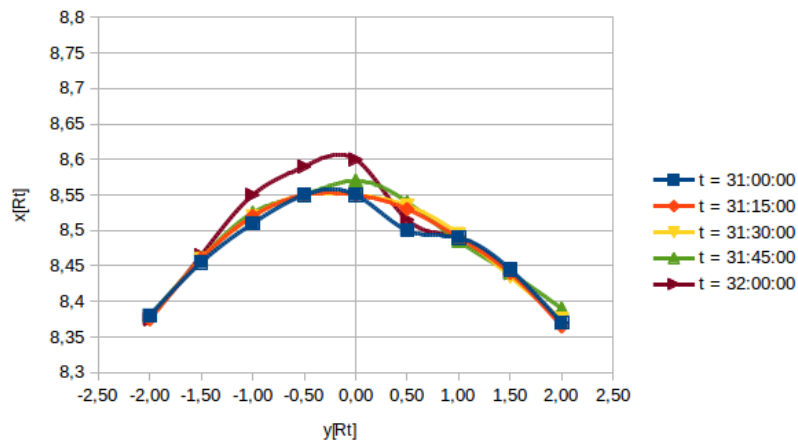
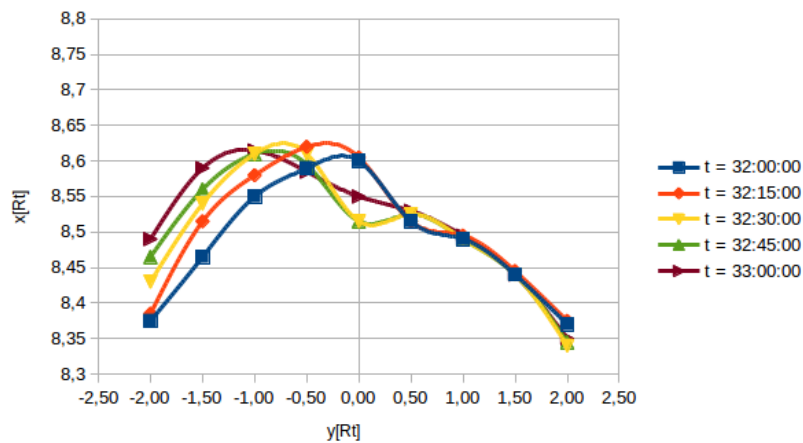


Figura 4.16 - Formato da magnetopausa em $z=0,0 R_t$ entre os instantes de tempo 32:00:00 e 33:00:00 UT.



5 PARTICIPAÇÃO EM EVENTOS E DIVULGAÇÃO CIENTÍFICA

Em paralelo com o trabalho de pesquisa da interação entre o vento solar e a magnetosfera terrestre, boa parte do segundo semestre de 2015 e primeiro semestre de 2016, foi dedicado à participação de congressos, eventos científicos e elaboração de artigos, com o objetivo de divulgar o trabalho realizado durante o período vigente da bolsa entre 2014 e 2016 e o aperfeiçoamento profissional como cientista. Neste capítulo serão listados e discutidos todos os eventos participados durante este período e as atividades realizadas em paralelo com a atividade de pesquisa.

5.1 Participação em congressos e eventos científicos

O segundo semestre de 2015 foi boa parte dedicado na participação de congressos e eventos científicos. Entre os eventos participados estão o Seminário de Iniciação Científica do INPE, o Simpósio Internacional de Iniciação Científica e Tecnológica da USP, a II Semana de Engenharia Física da USP, o *AGU Fall Meeting 2015 Earth and Space Science Virtual Poster Showcase*, a Escola de Verão do Instituto de Física da USP e o *Gamma* na Engenharia Física.

Os dois primeiros eventos listados são congressos de iniciação científica. O Seminário de Iniciação Científica do INPE (SICINPE), realizado em São José dos Campos no dia 30 de Julho de 2015, é de participação obrigatória para os bolsistas CNPq/INPE. Foi apresentado, em forma de pôster, o trabalho intitulado “Estudo da Interação entre o Vento Solar e a Magnetosfera Terrestre”, e o resumo referente à essa apresentação foi publicado nos anais do SICINPE. No segundo congresso, o 23º Simpósio Internacional de Iniciação Científica e Tecnológica da USP (SIICUSP), foi divulgado o mesmo trabalho e resultados, porém dessa vez na forma de apresentação oral, com o título “Estudo sobre Eventos de Transferência de Fluxo na magnetopausa utilizando simulação magneto-hidrodinâmica”. O resumo referente à essa apresentação foi publicado nos anais do SIICUSP.

A II Semana de Engenharia Física da USP, realizada nos dias 19 a 23 de outubro de 2015, é um evento anual realizado pelo Centro Acadêmico de Engenharia Física (CAEF) da Escola de Engenharia de Lorena da USP (EEL-USP), com o objetivo de ministrar palestras, minicursos e divulgar trabalhos de iniciação científica à comunidade da EEL-USP relacionados à Engenharia Física. Foi aproveitada essa oportunidade para divulgar os resultados obtidos deste trabalho, e apresentar aos estudantes e docentes da EEL-USP um pouco mais sobre a

área de Geofísica Espacial. Destaca-se também a participação de minicursos na II Semana de Engenharia Física da USP sobre Simulação em Python, Cosmologia e Gravitação, Mecânica Clássica e Introdução à Estrutura Eletrônica do Grafeno.

Em especial, destaca-se a participação na *AGU Fall Meeting 2015 Earth and Space Science Virtual Poster Showcase* com a apresentação do trabalho intitulado *Study of Flux Transfer Event at Dayside Magnetopause using MHD simulation*. A *American Geophysical Union (AGU)* é uma das principais organizações mundiais de geofísicos e realiza anualmente congressos para a divulgação dos trabalhos na área de Geofísica. A participação nesse congresso consistiu na submissão online de um resumo do trabalho juntamente com um pôster e um vídeo de 5 minutos apresentando o trabalho em inglês. Posteriormente, foi exigida a participação no julgamento de outros 3 trabalhos de estudantes que também participavam deste congresso. Por último, teve-se que responder perguntas feitas por cientistas relacionadas à pesquisa. Ao fim de tudo, foi recebido um certificado da *American Geophysical Union* confirmando a participação com sucesso em todas as etapas.

O tradicional Curso de Verão do Instituto de Física da USP, foi realizado em São Paulo no período de 1 a 4 de fevereiro de 2016. Esse evento foi importante para o *networking* com estudantes e pesquisadores das mais diversas áreas da Física e o aprimoramento profissional como pesquisador. Durante a semana, foi realizado um minicurso de Escala Nanométrica e aconteceram diversas palestras introduzindo os alunos participantes nas mais recentes áreas de pesquisa em Física.

O *Gamma* na Engenharia Física, é um evento organizado pelo CAEF/EEL-USP, que visa divulgar à comunidade da EEL-USP as áreas em que os alunos de iniciação científica do curso de Engenharia Física atuam. Visto isso, em 2016, foi ministrada uma palestra à esse evento com o título “Geofísica Espacial: Uma viagem interplanetária aos grandes portais de energia da Terra”, com o objetivo de despertar o interesse dos estudantes da EEL-USP na área de Geofísica Espacial.

5.2 Divulgação científica

Em paralelo com a atividade de pesquisa, o primeiro semestre de 2016 foi dedicado à elaboração de artigos científicos para a *Revista Brasileira de Ensino de Física*. O objetivo é introduzir aos alunos de graduação, pós-graduação e pesquisadores alguns conceitos e temas relevantes na área de Geofísica Espacial.

O primeiro artigo elaborado é intitulado como “Conceitos físicos envolvidos na construção matemática de um modelo magneto-hidrodinâmico”. Os autores são, em ordem, Flavia Reis Cardoso, Edio da Costa Junior, **Pedro Pires Ferreira**, Fernando Jaques Ruiz Simões Junior, Maria Virgínia Alvez e Daiki Koga. Esse artigo tem o objetivo principal apresentar aos leitores os conceitos envolvidos na construção de um modelo magneto-hidrodinâmico para tratamento de plasmas. Nesse trabalho são apresentados os modelos de plasma frio, plasma morno, plasma quente e o modelo MHD ideal, além de exemplos de aplicação da simulação MHD em Física Espacial e a utilização do modelo numérico. Este artigo foi submetido para a revista e esta em processo de avaliação.

O segundo artigo elaborado é intitulado como “Conceitos básicos sobre a física da reconexão magnética e da formação de tubos de fluxo magnético nas proximidades da Terra”. Os autores são, em ordem, **Pedro Pires Ferreira**, Marcos Vinícius Dias Silveira, Flavia Reis Cardoso, Vitor Moura Cardoso e Silva Souza, Daiki Koga, Germán Fariñas Pérez e Luis Eduardo Antunes Vieira. Esse artigo comporta uma explicação geral e introdutória sobre os principais conceitos da interação entre o vento solar e a magnetosfera terrestre, e da reconexão magnética. Também são apresentados os principais modelos teóricos que explicam qualitativamente os eventos de transferência de fluxo e os principais trabalhos e as mais recentes conclusões e estudos que surgiram após o trabalho pioneiro de Russel e Elphic. Este artigo foi submetido para a revista e esta em processo de avaliação.

6 CONCLUSÕES

Esse trabalho apresenta resultados de uma simulação magneto-hidrodinâmica em três dimensões da interação entre o vento solar e a magnetosfera terrestre. Foi observado a ocorrência de um FTE no ponto subsolar em $x=8.5 R_t$, $y=0 R_t$ e $z=0 R_t$, em um período de simulação compreendido entre 31:00 e 32:45. Pérez (2014) observou o mesmo evento de transferência de fluxo estudado neste trabalho utilizando o *software* Kameleon no ponto $x=8.5 R_t$, $y=-0,3 R_t$ e $z=0.7 R_t$ em um período de simulação entre 31:30 e 34:30, porém o autor não entrou em detalhe sobre a estrutura desse FTE.

A estrutura gerada foi identificada, no início de sua formação, como tubos de fluxo interligados. Nossos resultados conferem com a topologia obtida no trabalho de (HESSE et al., 1990), que também obtiveram tubos de fluxo interligados. Outros autores como (CARDOSO et al., 2013) investigaram a ocorrência de tubos de fluxo interligados, chegando à conclusão que o fenômeno observado correspondia aos modelos propostos por (RUSSELL; ELPHIC, 1978), pelo formato dos tubos de fluxo, e (LEE; FU, 1985), pelas múltiplas linhas de reconexão. Em seu trabalho, (CARDOSO et al., 2013) concluíram que os tubos de fluxo interligados são gerados por duas linhas X de reconexão.

Nossos resultados conferem com o modelo de (SOUTHWOOD et al., 1988) para eventos de transferência de fluxo que propõe o surgimento de protuberâncias na pressão de plasma se propagando na magnetopausa e baseia-se numa única linha de reconexão que gera uma perturbação no campo criando tubos de fluxo. Entretanto, a topologia proposta por (SOUTHWOOD et al., 1988) prevê a formação de dois tubos que contém um lado conectado com a Terra e o outro com o campo magnético interplanetário, sendo que o tubo de cima está conectado como Hemisfério Norte e o tubo de baixo com o Hemisfério Sul, não configurando em tubos de fluxo interligados. Uma possível explicação para a discrepância entre o único ponto de reconexão encontrado para o nosso evento (em concordância com o Southwood), e as múltiplas linhas observadas por (CARDOSO et al., 2013), já que a topologia magnética é mais precisa que os dados de velocidade, é que a alta intensidade do fluxo do vento solar pode ter induzido nossos resultados de velocidade para encontrar uma única linha de reconexão. A alta velocidade do vento solar pode esconder os fluxos provenientes de outros pontos de reconexão com valores de velocidades bem inferiores.

Porém, desconsiderando a hipótese de que a intensidade do vento solar tenha mascarado linhas X de reconexão, os resultados tendem para o modelo de Southwood em todos os aspectos analisados, excluindo a topologia, que confere com os resultados de (HESSE et al., 1990). Nossos resultados conferem com a afirmação de (DING et al., 1991) que FTEs gerados por uma única linha de reconexão apresentam sinal bipolar assimétrico.

Através da análise da densidade de corrente, foi constatado que o formato da magnetopausa pode variar consideravelmente durante o processo de reconexão e a ocorrência de tubos de fluxo magnético. Essas oscilações, conseqüentemente, podem afetar na análise dos dados para o estudo de eventos de transferência de fluxo. No nosso caso, foi verificado que as variações na magnetopausa não influenciaram diretamente nas medidas de campo feitas pelo satélite virtual. Por outro lado, observou-se que através da análise da distância da magnetopausa, pode-se direcionar as regiões à serem investigadas para identificar fenômenos na magnetosfera.

Foi verificado que para identificar um FTE é necessário um sistema de coordenadas normal à magnetopausa, o qual a simulação não fornecia em suas ferramentas padrões. Trabalhos como o de Pérez (2014) utilizaram a mesma simulação em conjunto com o *software* Kameleon, desenvolvido pela CCMC para otimizar a análise das simulações e proporcionar formatos de saída diferentes, que possibilitam o uso desse sistema de coordenadas normal à magnetopausa através do desenvolvimento de rotinas programáveis.

Pode-se sintetizar as principais conclusões e considerações sobre estes resultados da seguinte forma:

- Foi observado um evento de transferência de fluxo apresentando variação bipolar na componente normal ao campo e outras características encontradas na literatura.
- As assinaturas do campo magnético dos FTEs são intimamente relacionadas com a utilização de um sistema de coordenadas normal à magnetopausa.
- As características do modelo de (SOUTHWOOD et al., 1988) e do trabalho de (HESSE et al., 1990) em conjunto explicam as assinaturas do campo magnético e a topologia magnética dos tubos de fluxos interligados observados.

- Características como resolução da simulação podem afetar os dados apurados e conseqüente o estudo de eventos de transferência de fluxo.
- A reconexão magnética e outros fenômenos na magnetosfera, como eventos de transferência de fluxo, podem modificar o formato da magnetopausa.

Nosso trabalho obteve importantes resultados para o estudo sobre FTEs. Os resultados obtidos estão em concordância com a literatura, porém a topologia observada apresenta uma estrutura incomum entre trabalhos já publicados que também assemelham-se com o modelo de (SOUTHWOOD *et al.*, 1988), mostrando ser um evento com grande potencial para novas descobertas. Sabe-se muito pouco ainda sobre as características dos FTEs, porque eles surgem, como eles se propagam, e a relação deles com a reconexão magnética na magnetopausa diurna, e Cardoso, orientadora deste trabalho, em seu artigo também observou tubos de fluxo interligados utilizando a mesma ferramenta da NASA CCMC utilizada neste trabalho, mostrando que essa ferramenta é uma rica fonte de estudo para eventos de transferência de fluxo e reconexão magnética. Em paralelo à atividade de pesquisa, e não menos importante, a participação de eventos e congressos científicos, junto com o trabalho de desenvolvimento de artigos científicos, mostrou-se uma experiência enriquecedora e extremamente importante para a formação de um cientista.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALFVEN, H. t. On the theory of comet tails. **Tellus**, Wiley Online Library, v. 9, n. 1, p. 92–96, 1957. 1
- BAUMJOHANN, W.; TREUMANN, R. A.; TREUMANN, R. A. **Basic space plasma physics**. [S.l.]: World Scientific, 1996. 4, 5
- BERCHEM, J.; RUSSELL, C. T. Flux transfer events on the magnetopause - Spatial distribution and controlling factors. **Journal of Geophysical Research**, v. 89, n. A8, p. 6689–6703, ago. 1984.
- CARDOSO, F.; GONZALEZ, W.; SIBECK, D.; KUZNETSOVA, M.; KOGA, D. Magnetopause reconnection and interlinked flux tubes. In: COPERNICUS GMBH. **Annales Geophysicae**. [S.l.], 2013. v. 31, n. 10, p. 1853–1866. 15, 16, 19, 45
- CRAVENS, T. E. **Physics of solar system plasmas**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2004. 2
- DING, D.; LEE, L.; MA, Z. Different fte signatures generated by the bursty single x line reconnection and the multiple x line reconnection at the dayside magnetopause. **Journal of Geophysical Research: Space Physics (1978–2012)**, Wiley Online Library, v. 96, n. A1, p. 57–66, 1991. 26, 46
- DORELLI, J.; BHATTACHARJEE, A. On the generation and topology of flux transfer events. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, Wiley Online Library, v. 114, n. A6, 2009. 19
- ECHER, E.; ALVES, M.; GONZALEZ, W. Ondas de choque não colisionais no espaço interplanetário. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, SciELO Brasil, v. 28, n. 1, p. 51–66, 2006. 2
- ELPHIC, R.; RUSSELL, C. Isee-1 and 2 magnetometer observations of the magnetopause. In: **Magnetospheric boundary layers**. [S.l.: s.n.], 1979. v. 148, p. 43–50. 3, 14
- ELPHIC, R. C. Observations of Flux Transfer Events: A Review. In: _____. **Physics of the Magnetopause**. [S.l.]: the American Geophysical Union, 1995. p. 225–+.
- ELPHIC, R. C.; LOCKWOOD, M.; COWLEY, S. W. H.; SANDHOLT, P. E. Flux transfer events at the magnetopause and in the ionosphere. **Geophysical Research Letters**, v. 17, p. 2241–2244, nov. 1990.

FEAR, R. C.; MILAN, S. E.; FAZAKERLEY, A. N.; LUCEK, E. A.; COWLEY, S. W. H.; DANDOURAS, I. The azimuthal extent of three flux transfer events. **Annales Geophysicae**, v. 26, n. 8, p. 2353–2369, ago. 2008.

Fear, R. C.; Milan, S. E.; Fazakerley, A. N.; Fornaçon, K.-H.; Carr, C. M.; Dandouras, I. Simultaneous observations of flux transfer events by THEMIS, Cluster, Double Star, and SuperDARN: Acceleration of FTEs. **Journal of Geophysical Research**, v. 114, p. A10213, out. 2009.

FILHO, K. de S. O.; FILHO, K. de S. O.; SARAIVA, M. d. F. O. **Astronomia e astrofísica**. [S.l.]: Ed. Universidade/UFRGS, 2000. 1

GLASSMEIER, K.-H.; STELLMACHER, M. Mapping flux transfer events to the ionosphere. **Advances in Space Research**, v. 18, p. 151–160, 1996.

GONZALEZ, W.; MOZER, F. A quantitative model for the potential resulting from reconnection with an arbitrary interplanetary magnetic field. **Journal of Geophysical Research**, v. 79, n. 28, p. 4186–4194, 1974. 10

HAERENDEL, G.; PASCHMANN, G.; SCKOPKE, N.; ROSENBAUER, H.; HEDGECOCK, P. The frontside boundary layer of the magnetosphere and the problem of reconnection. **Journal of Geophysical Research**, v. 83, p. 3195–3216, 1978. 20

HESSE, M.; BIRN, J.; SCHINDLER, K. On the topology of flux transfer events. **Journal of Geophysical Research**, v. 95, n. A5, p. 6549–6560, 1990. 15, 16, 35, 45, 46

HUNDHAUSEN, A. J. Coronal expansion and solar wind. **Coronal Expansion and Solar Wind, XII, 238 pp. 101 figs.. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York. Also Physics and Chemistry in Space, volume 5, v. 1, 1972. 1**

JR, E. C.; JR, F. S.; CARDOSO, F.; ALVES, M. Solar wind and geomagnetic activity. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, SciELO Brasil, v. 33, n. 4, p. 4301–4301, 2011. 1, 4

JUNIOR, E. da C.; ALVES, M. V. Radiação quilométrica auroral. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 37, n. 4, 2015. 4

KU, H. C.; SIBECK, D. G. Internal structure of flux transfer events produced by the onset of merging at a single x line. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, Wiley Online Library, v. 102, n. A2, p. 2243–2260, 1997. 19

KUZNETSOVA, M.; HESSE, M.; RASTÄTTER, L.; TAKTAKISHVILI, A.; TOTH, G.; ZEEUW, D. D.; RIDLEY, A.; GOMBOSI, T. Multiscale modeling of magnetospheric reconnection. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, Wiley Online Library, v. 112, n. A10, 2007. 19

LAKHINA, G. A kinetic theory of driven reconnection in the earth's magnetotail. **Journal of Geophysical Research: Space Physics (1978–2012)**, Wiley Online Library, v. 97, n. A3, p. 2961–2972, 1992. 8

LEE, L. C.; FU, Z. F. A theory of magnetic flux transfer at the earth's magnetopause. **Geophysical Research Letters**, v. 12, n. 2, p. 105–108, February 1985. 11, 14, 15, 45

LEE, L. C.; MA, Z.; OTTO, A. Topology of magnetic flux ropes and formation of fossil flux transfer events and boundary layer plasmas. **Journal of Geophysical Research**, v. 98, n. A3, p. 3943–3951, 1993. 15

LOUARN, P.; FEDEROV, A.; BUDNIK, E.; FRUIT, G.; SAUVAUD, J. A.; HARVEY, C. C.; DANDOURAS, I. Cluster observations of complex 3d magnetic structures at the magnetopause. **Geophysical Research Letters**, v. 31, p. L19805, 2004. 15

NEUDEGG, D. A.; COWLEY, S. W. H.; MILAN, S. E.; YEOMAN, T. K.; LESTER, M.; PROVAN, G.; HAERENDEL, G.; BAUMJOHANN, W.; NIKUTOWSKI, B.; BÜCHNER, J.; AUSTER, U.; FORNACON, K.-H.; GEORGESCU, E. A survey of magnetopause FTEs and associated flow bursts in the polar ionosphere. **Annales Geophysicae**, v. 18, p. 416–435, abr. 2000.

OLIVEIRA, D.; SILVEIRA, M. Clima espacial e choques interplanetários. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 38, n. 1, 2016. 1

OTTO, A. Forced three-dimensional magnetic reconnection due to linkage of magnetic flux tubes. **Journal of Geophysical Research**, v. 100, n. A7, p. 11,863–11,874, 1995. 15

OWEN, C. J.; MARCHAUDON, A.; DUNLOP, M. W.; FAZAKERLEY, A. N.; BOSQUED, J.-M.; DEWHURST, J. P.; FEAR, R. C.; FUSELIER, S. A.; BALOGH, A.; RÄME, H. Cluster observations of crater flux transfer events at the dayside high-latitude magnetopause. **Journal of Geophysical Research**, v. 113, n. A7, p. n/a–n/a, 2008. ISSN 2156-2202. A07S04. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1029/2007JA012701>>.

PASCHMANN, G.; HAERENDEL, G.; PAPAMASTORAKIS, I.; SCKOPKE, N.; BAME, S.; GOSLING, J.; RUSSELL, C. Plasma and magnetic field characteristics of magnetic flux transfer events. **Journal of Geophysical Research**, v. 87, n. A4, p. 2159–2168, April 1982. [14](#)

PASCHMANN, G.; HAERENDEL, G.; PAPAMASTORAKIS, I.; SCKOPKE, N.; BAME, S. J.; GOSLING, J. T.; RUSSELL, C. T. Plasma and magnetic field characteristics of magnetic flux transfer events. **Journal of Geophysical Research**, v. 87, n. A4, p. 2159–2168, abr. 1982.

POWELL, K. G.; ROE, P. L.; LINDE, T. J.; GOMBOSI, T. I.; ZEEUW, D. L. D. A solution-adaptive upwind scheme for ideal magnetohydrodynamics. **Journal of Computational Physics**, Elsevier, v. 154, n. 2, p. 284–309, 1999. [19](#)

RIDLEY, A.; RICHMOND, A.; GOMBOSI, T.; ZEEUW, D. D.; CLAUER, C. Ionospheric control of the magnetospheric configuration: Thermospheric neutral winds. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, Wiley Online Library, v. 108, n. A8, 2003. [19](#)

RIJNBEEK, R. P.; COWLEY, S. W. H.; SOUTHWOOD, D. J.; RUSSELL, C. T. Observations of reverse polarity flux transfer events at the Earth's dayside magnetopause. **Nature**, v. 300, p. 23–26, nov. 1982.

_____. A survey of dayside flux transfer events observed by ISEE 1 and 2 magnetometers. **Journal of Geophysical Research**, v. 89, n. A2, p. 786–800, fev. 1984.

RUSSELL, C. Solar wind and interplanetary magnetic field: A tutorial. **Space Weather**, Wiley Online Library, p. 73–89, 2001. [2](#)

RUSSELL, C. T.; BERCHEM, J.; LUHMANN, J. G. On the source region of flux transfer events. **Advances in Space Research**, v. 5, p. 363–368, 1985.

RUSSELL, C. T.; ELPHIC, R. C. Initial isee magnetometer results: Magnetopause observations. **Space Science Reviews**, v. 22, p. 681–715, 1978. [10](#), [11](#), [12](#), [14](#), [20](#), [22](#), [45](#)

RUSSELL, C. T.; LE, G.; KUO, H. The occurrence rate of flux transfer events. **Advances in Space Research**, v. 18, p. 197–205, 1996.

SCHOLER, M. Magnetic flux transfer at the magnetopause based on single x line bursty reconnection. **Geophysical research letters**, Wiley Online Library, v. 15, n. 4, p. 291–294, 1988. [11](#)

SIBECK, D.; LIN, R.-Q. Size and shape of the distant magnetotail. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, Wiley Online Library, v. 119, n. 2, p. 1028–1043, 2014. 2

SIBECK, D. G.; LIN, R.-Q. Concerning the motion of flux transfer events generated by component reconnection across the dayside magnetopause. **Journal of Geophysical Research**, v. 115, p. A04209, abr. 2010.

SILVEIRA, M. V. D. **Study of flux transfer events observed at the Earth's magnetopause by THEMIS satellites**. 111 p. Tese (Doutorado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2015-03-03 2015. Disponível em:
<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m21b/2015/02.09.23.47>>. Acesso em: 10 maio 2016.

SISCOE, G.; DAVIS, L.; COLEMAN, P.; SMITH, E.; JONES, D. Power spectra and discontinuities of the interplanetary magnetic field: Mariner 4. **Journal of Geophysical Research**, Wiley Online Library, v. 73, n. 1, p. 61–82, 1968. 11

SONNERUP, B. Ö.; CAHILL, L. Magnetopause structure and attitude from explorer 12 observations. **Journal of Geophysical Research**, Wiley Online Library, v. 72, n. 1, p. 171–183, 1967. 11

SOUTHWOOD, D.; FARRUGIA, C.; SAUNDERS, M. What are flux transfer events. **Planetary and Space Science**, v. 36, n. 5, p. 503–508, 1988. 11, 15, 19, 45, 46, 47

TÓTH, G.; SOKOLOV, I. V.; GOMBOSI, T. I.; CHESNEY, D. R.; CLAUER, C. R.; ZEEUW, D. L. D.; HANSEN, K. C.; KANE, K. J.; MANCHESTER, W. B.; OEHMKE, R. C. et al. Space weather modeling framework: A new tool for the space science community. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, Wiley Online Library, v. 110, n. A12, 2005. 19

TREUMANN, R. A.; BAUMJOHANN, W. **Advanced Space Plasma Physics**. London: Imperial College Press, 1997. 143 p. 7, 9, 10

ZWEIBEL, E. G.; YAMADA, M. Magnetic reconnection in astrophysical and laboratory plasmas. **Annual review of astronomy and astrophysics**, Annual Reviews, v. 47, p. 291–332, 2009. 9

PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE

Teses e Dissertações (TDI)

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

Manuais Técnicos (MAN)

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

Notas Técnico-Científicas (NTC)

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

Relatórios de Pesquisa (RPQ)

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

Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)

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

Publicações Didáticas (PUD)

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

Publicações Seriadas

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

Programas de Computador (PDC)

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

Pré-publicações (PRE)

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