

ESTUDO DA INTERAÇÃO ENTRE O VENTO SOLAR E A MAGNETOSFERA TERRESTRE

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

Pedro Pires Ferreira (EEL-USP, Bolsista PIBIC/CNPq)
E-mail: pedrop.ferreira96@gmail.com

Luis Eduardo Antunes Vieira (LAC/CTE/INPE, Orientador)
E-mail: luis.vieira71@googlemail.com

Flavia Reis Cardoso (EEL-USP, Orientador)
E-mail: flaviacardoso@usp.br

Julho de 2015

Sumário

1	Fundamentação teórica	3
1.1	Conceitos básicos sobre magnetosfera e vento solar	3
1.2	Reconexão magnética	8
1.3	Eventos de transferência de fluxo	10
2	Objetivos	13
2.1	Objetivo geral	13
2.2	Objetivos específicos	13
3	Metodologia	14
4	Resultados e discussão	19
5	Conclusões	33
6	Referências bibliográficas	36

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 magneto-hidrodinâmica 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 e topologias magnéticas, 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.

1 Fundamentação teórica

1.1 Conceitos básicos sobre magnetosfera e vento solar

A pesquisa em Geofísica Espacial se concentra no estudo das interações entre as inúmeras partículas existentes no meio interplanetário e campos eletromagnéticos. A atividade magnética resultante dessas interações influencia diretamente no clima terrestre e em sistemas de telecomunicações. Essas partículas são altamente energéticas e carregadas, sendo que a energia da maior parte delas provém do sol.

O vento solar é um fluxo de partículas ionizadas - núcleos de hidrogênicos ionizados e elétrons - provenientes do sol que viajam no meio interplanetário. Esse vento é resultado da diferença de pressão existente entre a coroa solar e o espaço interplanetário, vencendo a força gravitacional do Sol. Pode-se classificá-lo como vento solar rápido, quando é originado nos buracos coronais sendo relacionados com as linhas de campo magnético abertas, como de um polo magnético, e como vento solar lento, quando é originado em regiões próximas ao equador do Sol, sendo esse um fluxo mais irregular. (COSTA JUNIOR et al., 2011).

O vento solar propaga-se pelo meio interplanetário e atinge a 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 apresenta as regiões mais importantes que compõem a magnetosfera terrestre. O lado diurno - segundo Costa Junior et al. (2011) se estende à 10 raios terrestres em condições de vento solar calmo, sendo um raio terrestre aproximadamente 6370 km - é composto principalmente pela frente de choque, magnetopausa, bainha magnética e as cúspides polares. O lado noturno é conhecido como cauda magnétosférica pelo seu formato de cauda ocasionado pelo arraste do vento solar, podendo chegar a distâncias superiores à 200 raios terrestres. (LUCAS, 2005).

Na Figura 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, de acordo com Costa Junior et al. (2011), acontece pelo fato do vento solar apresentar velocidades maiores que a velocidade característica do meio, criando uma onda de choque. Depois de atravessar essa onda de choque as partículas ainda passam por uma forte

turbulência gerada por características do meio que diferem das propriedades do plasma solar e da magnetosfera terrestre, essa região é conhecida como bainha magnética. Nas altas latitudes próximas às regiões dos polos, como mostrado na Figura 1, existem as cúspides polares, que são as regiões onde as partículas tem mais facilidade para penetrar na atmosfera terrestre. 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 magnetopausa é a região que separa o campo magnético terrestre e interplanetário.

A região noturna da magnetosfera, localizada na direção anti-solar, é um grande reservatório de energia e plasma, mais conhecida como cauda magnetosférica (*magnetotail*). Na cauda existem dois lóbulos distintos, o norte - as linhas de campo magnético são direcionadas para o planeta - e o sul na qual as linhas de campo magnético são contrárias às do lóbulo norte, existindo entre eles uma corrente conhecida como lâmina de plasma (*plasmasheth*). Segundo Lucas (2005), existe uma corrente na região equatorial conhecida como corrente de anel, e o comportamento dela é determinante para caracterizar as atividades magnéticas, que são fenômenos perturbativos no campo geomagnético decorrentes da entrada e saída de partículas e, consequentemente, energia.

A interação vento solar-magnetosfera terrestre está diretamente relacionada com um fenômeno conhecido como "congelamento" das linhas de campo magnético. Portanto, para uma melhor análise dessas interações, é necessário conhecer os pilares da teoria magneto-hidrodinâmico (MHD), que é utilizada em diversas simulações 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.

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

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \nabla \cdot (n\mathbf{u}) = 0, \quad (1)$$

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 velocidade do elemento de fluido com sua densidade, e força eletromagnética sobre ele:

$$\frac{\partial(nm\mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (nm\mathbf{u}\mathbf{u}) = -\nabla \cdot P + \rho\mathbf{E} + \mathbf{j} \times \mathbf{B}, \quad (2)$$

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.

Enfim, a última equação MHD é a equação de conservação de energia:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[nm \left(\frac{1}{2}u^2 + w \right) + \frac{B^2}{2\mu_0} \right] = -\nabla \cdot \mathbf{q}, \quad (3)$$

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, 2 e 3 é complementado pelas equações de Maxwell devido aos campos elétricos e magnéticos contidos na região do plasma e no seu interior.

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -\nabla \times \mathbf{E}, \quad (4)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}, \quad (5)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (6)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{1}{\epsilon_0} \rho. \quad (7)$$

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 5 por possuir valores menores que a corrente de condução. Ainda assim, é necessário fazer algumas imposições para diminuir o número de incógnitas, como considerar o sistema em um estado adiabático ou isotérmico. Através da combinação de todas essas equações, simplificações e imposições, é possível obter a Lei de Ohm generalizada (BAUMJOHANN; TREUMANN, 1996),

$$\mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{B} = \eta \mathbf{j} + \frac{1}{ne} \mathbf{j} \times \mathbf{B} - \frac{1}{ne} \nabla \cdot P_e + \frac{m_e}{ne^2} \frac{\partial \mathbf{j}}{\partial t}, \quad (8)$$

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

A Equação 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 $\sigma = \frac{1}{\eta}$, podemos escrever a Lei de ohm da seguinte forma:

$$\mathbf{j} = \sigma (\mathbf{E} + \mathbf{u} \times \mathbf{B}), \quad (9)$$

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:

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{u} \times \mathbf{B}) + \eta_m \nabla^2 \mathbf{B}, \quad (10)$$

onde \mathbf{u} é a velocidade média das partículas do plasma e η_m é a viscosidade magnética tal que $\eta_m = 1/\mu_0\sigma_0$, com μ_0 sendo a constante da permeabilidade magnética do vácuo e σ_0 a constante da condutividade elétrica do meio.

O termo $\nabla \times (\mathbf{u} \times \mathbf{B})$ da Equação 10 descreve a convecção magnética junto com o fluxo do plasma, e $\eta_m \nabla^2 \mathbf{B}$ descreve a difusão, sendo que a razão entre esses dois termos é conhecido na teoria 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 só depende da viscosidade magnética, como mostrado na seguinte equação:

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \eta_m \nabla^2 \mathbf{B}. \quad (11)$$

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 no interior do plasma dependerá apenas da velocidade média das partículas do plasma.

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{u} \times \mathbf{B}), \quad (12)$$

Resolvendo a Equação 11 de difusão, considerando o comprimento característico sob o qual o campo magnético varia, L_B , é possível obter a solução da equação diferencial:

$$B = B_0 e^{-\frac{x}{\tau_d}} \quad (13)$$

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

$$\tau_d = \mu_0 \sigma L_B^2. \quad (14)$$

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, com isso, a convecção é dominante na Lei de Ohm e o campo magnético move-se congelado ao fluxo do plasma (BAUMJOHANN; TREUMANN, 1996).

A Equação 12 mostra que em um plasma altamente condutor as linhas de campo magnético movem-se junto com o plasma ao invés de difundir. Portanto, quando a diferença de pressão entre a coroa solar e o espaço interplanetário é tão alta vencendo a força gravitacional solar e expelindo plasma altamente condutor para o espaço interplanetário, esse plasma leva consigo

as linhas de campo, fazendo com que o campo magnético interplanetário seja uma espécie de expansão do campo magnético solar (RIBEIRO, 2013).

O vento solar se propaga pelo meio interplanetário com o campo magnético congelado à ele, e as magnetosferas planetárias funcionam como se fossem escudos protetores à essas partículas ionizadas. O plasma do vento solar interage com a magnetosfera terrestre criando perturbações em seu campo magnético e sistemas de correntes, gerando tempestades e subtempestades magnéticas. (COSTA JUNIOR et al., 2011).

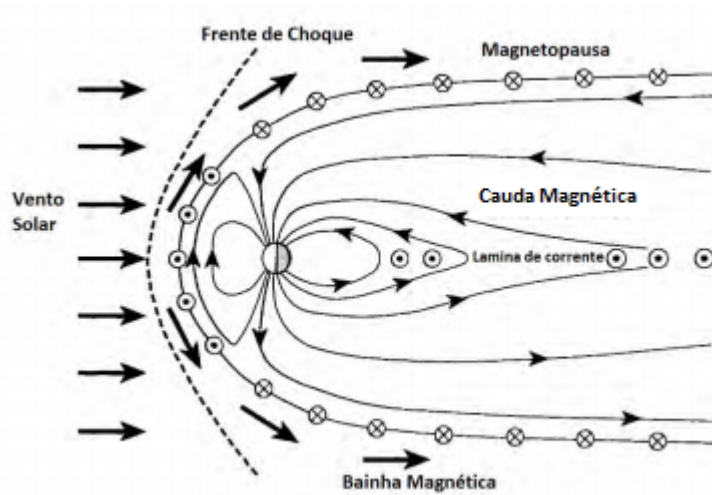


Figura 1: Representação simplificada da magnetosfera terrestre que é formada a partir da interação do vento solar com o campo magnético interplanetário. Pode-se observar a frente de choque antes da magnetopausa e a bainha magnética entre essas duas regiões. Na cauda magnética, na parte noturna da magnetosfera, existe um importante sistema de correntes chamado de lâmina de corrente. Fonte: Adaptado de Ribeiro (2013).

1.2 Reconexão magnética

O principal fenômeno responsável pela entrada/saída de partículas e energia da magnetosfera terrestre é a reconexão magnética (DUNGEY, 1961). Silveira (2011) define a reconexão como a reestruturação topológica de um campo magnético causada pela mudança da conectividade de suas linhas

de campo. Esse fenômeno é muito estudado na área de geofísica espacial, principalmente através de dados simulados numericamente que podem ser baseados, basicamente, considerando a teoria cinética de plasma ou um único fluido através do sistema magneto-hidrodinâmico (MHD).

O plasma do vento solar é altamente condutor, conseqüentemente, como analisado na Equação 10, ocorre o congelamento das linhas de campo interplanetário que se locomovem junto ao plasma. Portanto, a entrada de energia na magnetosfera terrestre só é possível se houver o rompimento dessas linhas de campo interplanetário com o campo geomagnético, ocorrendo uma fusão entre eles. Geralmente, essa reconexão ocorre quando essas duas linhas de campo estão em direções opostas, como mostrado na Figura 2, permitindo a passagem do plasma através da fronteira da magnetopausa. Ao longo de todo o processo da reconexão magnética, o fluxo e topologia dos campos modificam-se, assim como ocorrem variações na velocidade e direção das partículas e da pressão onde ocorre a fusão das linhas de campo.

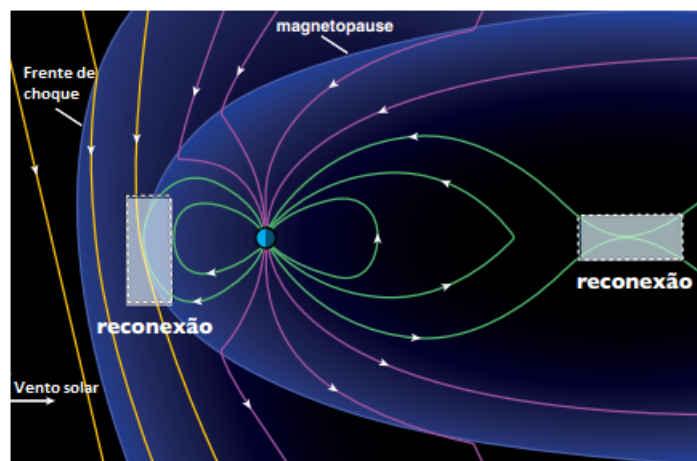


Figura 2: Representação das principais áreas onde ocorrem reconexão na magnetosfera terrestre para o campo magnético interplanetário sul. Tanto na parte diurna, como na parte noturna, as linhas de campo estão em sentidos opostos, possibilitando a reconexão magnética e a entrada/saída de partículas e energia na atmosfera. À frente da reconexão diurna pode-se observar a frente de choque (*bow shock*), desacelerando o vento solar (*solar wind*). Fonte: Koga (2013)

Como mostrado na Figura 2, o campo magnético na parte diurna do planeta Terra está orientado para o norte, portanto, para acontecer a reconexão magnética nas regiões destacadas na Figura 2 é necessário que o campo magnético interplanetário esteja orientado para o sul. Em relação a variação temporal, a reconexão pode ser estacionária ou transiente (Gonzalez e Mozer, 1974; Russel e Elphic, 1978).

1.3 Eventos de transferência de fluxo

Dorelli (2009) define, de maneira geral, eventos de transferência de fluxo como perturbações nas medidas do campo magnético causadas geralmente por reconexão magnética localizada e transiente. Russel e Elphic (1978) e Haerendel et al. (1978) definem eventos de transferência de fluxo como sendo fenômenos caracterizados pela assinatura bipolar da componente normal do campo magnético da magnetopausa e pelo intenso campo no núcleo. Ainda segundo Paschmann et al. (1982), esses eventos contêm uma mistura de plasma acelerado - plasma magnetosférico com o plasma da bainha magnetosférica - e geralmente os tubos de fluxo gerados tem cerca de 1 raio terrestre de tamanho (RIJNBEEK E COWLEY, 1984).

Existem três modelos bastante conhecidos que tentam explicar o mecanismo de geração dos eventos FTEs. O primeiro modelo foi proposto por Russel e Elphic (1978) e explica que os FTEs são gerados em regiões de reconexões irregulares e há a formação de um "cotovelo" no ponto em que um tubo de fluxo atravessa a magnetopausa. A Figura 3 mostra o modelo de Russel e Elphic para os FTEs. Esse modelo consiste de dois tubos de fluxo estreitos na sua extensão azimuntal e com seções transversais aproximadamente circulares. Longe da região de reconexão as linhas do fluxo têm a mesma orientação dos campos magnéticos da magnetosfera e da bainha magnética, enquanto que em regiões próximas da reconexão, as linhas curvam-se entre as duas orientações dos campos.

Lee e Fu (1985), propuseram um modelo composto por múltiplas linhas X de reconexão. A Figura 4 retrata esse modelo, onde há três linhas X de reconexão e os dois tubos de fluxo formados que possuem campo magnético helicoidal deslocam-se nas direções dos polos magnéticos devido à tensão magnética.

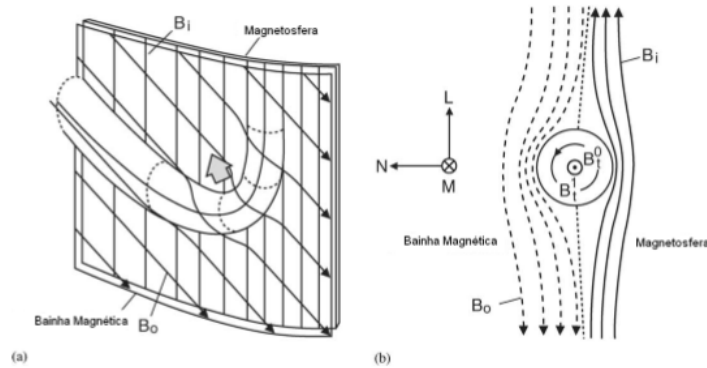


Figura 3: Modelo de Russel e Elphic para os FTEs. (a) Tubo de fluxo descrito por Russel e Elphic, formando um "cotovelo". (b) Corte na seção transversal do tubo de fluxo mostrando a rotação do campo magnético responsável pela assinatura bipolar do campo. Fonte: Adaptado de Russel e Elphic (1978) e Paschmann et al. (1982).

Southwood e Scholer, independentemente, propuseram um modelo baseado em uma única linha X, com a formação de dois tubos não fechados e com extensão azimutal. Em especial, Southwood et al. (1988) explicou as protuberâncias na magnetopausa observadas em simulações MHD, sendo originárias de um aumento da pressão térmica ocasionada pelo aquecimento do plasma no processo de reconexão. Com a propagação dos tubos formados, as linhas de campo reconectadas causam o comportamento bipolar da componente normal do campo.

A partir desses três modelos, muitos estudos observacionais têm revelado propriedades importantes dos FTEs. Paschmann et al. (1982) descrevem o desequilíbrio existente na soma da pressão de plasma e da pressão magnética dentro e fora dos tubos de fluxo e a relação inversamente proporcional entre a diminuição da densidade de partículas e o aumento da temperatura no interior da estrutura. Fedder et al. (2002) mostram resultados obtidos com um modelo de simulação MHD afirmando que FTEs podem aparecer tanto dentro como fora da magnetosfera, propagando-se ao longo da magnetopausa.

Ding et al. (1991) através de simulações, estudou a relação entre FTEs gerados através de uma linha X de reconexão e múltiplas linhas X de reconexão. Os autores observaram que FTEs gerados por múltiplas linhas X de reconexão apresentam comportamento padrão, com a componente normal do campo magnético indo de valores positivos para negativos, e reverso, indo

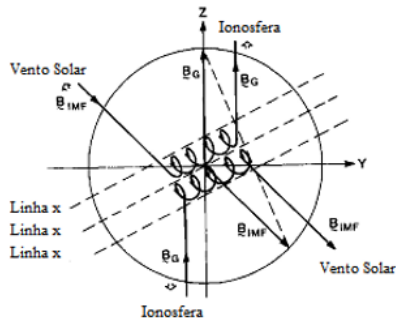


Figura 4: Modelo de FTE de múltiplas linhas X de reconexão proposto por Lee e Fu em 1985. Fonte: Adaptado de Silveira (2011).

de valores negativos para positivos, enquanto FTEs gerados por uma única linha de reconexão apresentaram sinal bipolar assimétrico e foram observados longe da região de reconexão.

Estudos como de Hesse, Birn e Schindler (1990), Cardoso et al. (2013), Louarn et al. (2004), Otto (1995) e Lee et al. (1993) descreveram tubos de fluxo interligados. Em especial, Hesse, Birn e Schindler (1990), através de uma simulação numérica, observou a formação de tubos parecidos com os descritos por Russel e Elphic (1985), porém interligados e formados a partir de uma reconexão localizada na parte diurna da magnetosfera.

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., 2004; Toth 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.

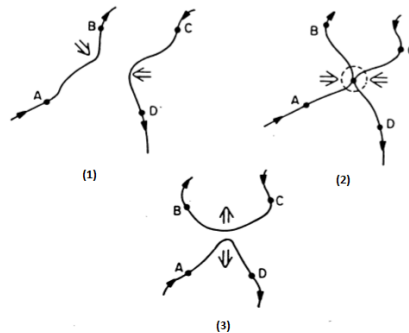


Figura 5: Observa-se em (1) a aproximação das linhas, (2) o rompimento de ambas ao tocarem-se em um determinado ponto e (3) o surgimento de duas novas linhas com direção perpendicular em relação à direção em (1) e com sentidos opostos. Fonte: Adaptado de Silveira (2011).

Para entender a escolha da velocidade como dado de visualização, considere duas linhas de campo magnético com direção e sentidos aproximadamente antiparalelos - suficiente para acontecer o fenômeno de reconexão - sobre o efeito de congelamento das linhas de campo, como mostrado na Figura 5. As linhas aproximam-se (1) e tocam-se em um ponto (2). Nesse instante pode-se considerar que o campo não está mais preso ao plasma, ocasionando no rompimento de ambas as linhas. Quando há esse rompimento as linhas são reagrupadas (3), iniciando o fenômeno de reconexão, dando origem a novas linhas de 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 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 6.

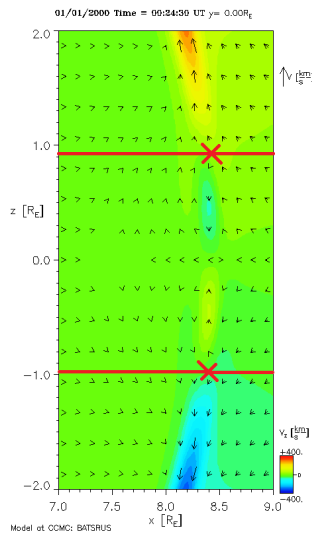


Figura 6: Visualização da velocidade (V_z) no instante 24:30. Observa-se dois pontos de reconexão baseados no parâmetro definido na metodologia deste trabalho. A partir de uma linha horizontal com origem no ponto candidato de reconexão, tem-se vetores velocidade com sentidos aproximadamente opostos ao redor da linha, caracterizando o processo (3) da Figura 5.

Em paralelo com a análise da velocidade (Vz), outro parâmetro considerado na metodologia deste trabalho foi a análise de protuberâncias na pressão da magnetopausa terrestre, como mostrada na Figura 7. Estudos feitos por Southwood (1988), Dorelli (2009) e Ku e 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 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.

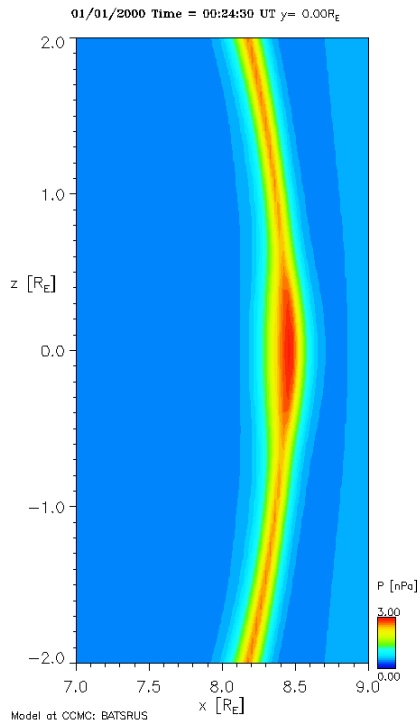


Figura 7: Visualização da pressão (P) no instante 24:30. Pode-se observar uma protuberância surgindo na magnetopausa aproximadamente na altura $z=0$, na região subsolar.

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. Como Russell e Elphic (1978) e 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 8 mostra a identificação dos FTEs encontrados por Russell e Elphic (1978).

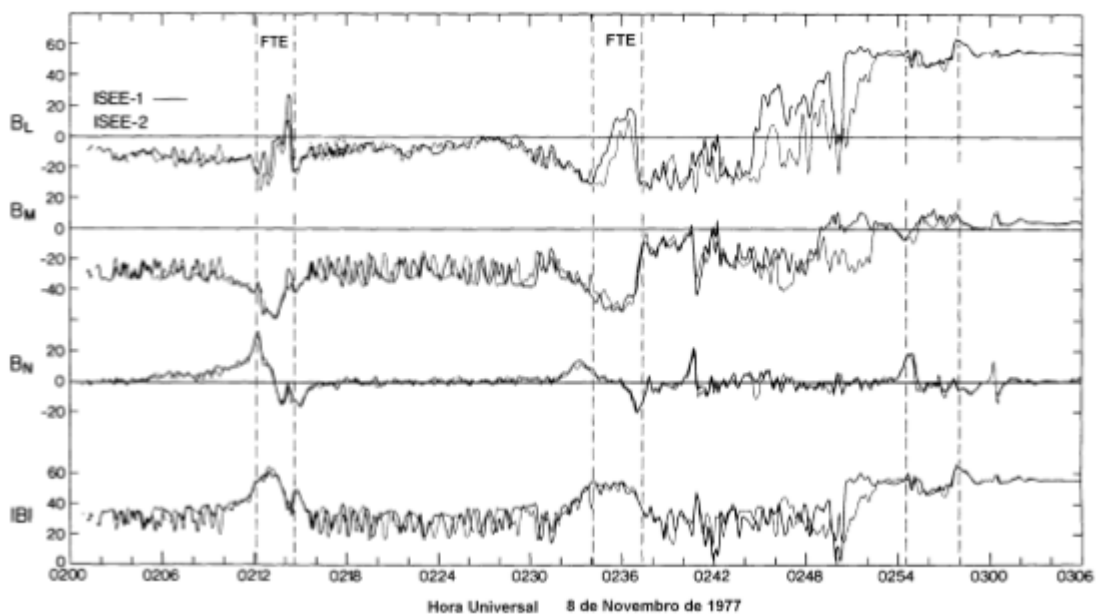


Figura 8: Identificação dos FTEs encontrados por Russell e Elphic (1978) através de medidas de campo magnético realizadas pelos satélites ISEE-1 e -2 no cruzamento da magnetopausa em 8 de novembro de 1977. As linhas verticais indicam a observação de FTEs. Fonte: Adaptado de Russell e Elphic (1978).

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 e estudo da estrutura de tubos magnéticos. A Figura 9 mostra um exemplo da mudança da topologia magnética ao longo do tempo em planos xz com $y=0$.

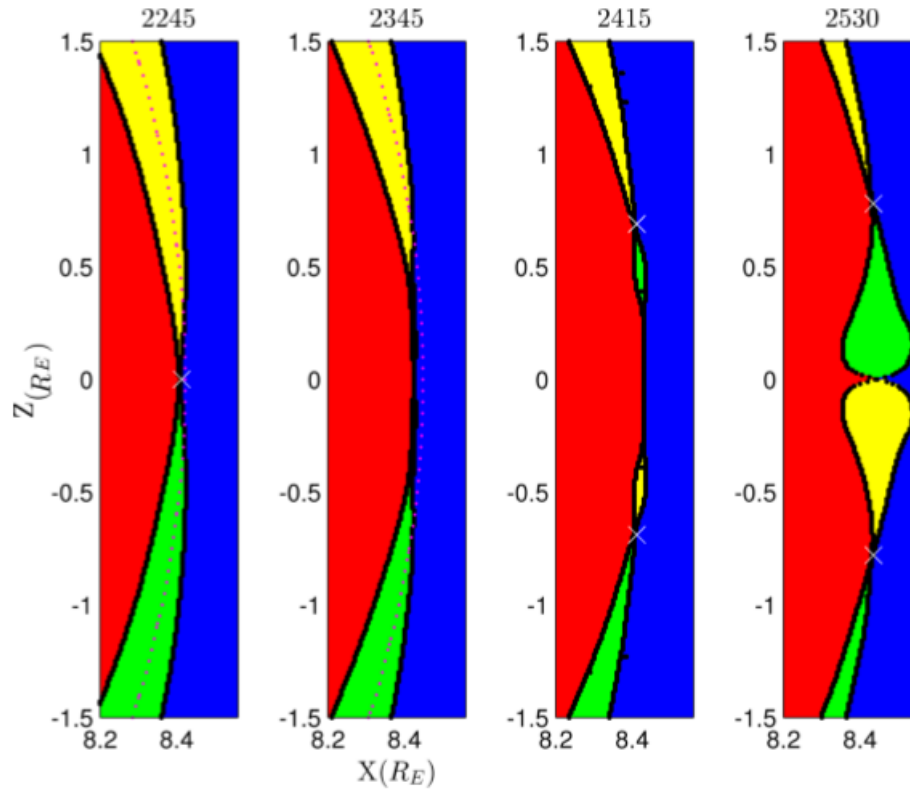


Figura 9: Mudança da topologia magnética em $y=0$ para diferentes tempos. A cor vermelha são linhas fechadas, amarelo conectadas ao norte, verde conectadas ao sul e azul conectadas com o campo interplanetário. Fonte: Pérez (2014).

4 Resultados e discussão

Através da análise da pressão na magnetopausa ao longo do tempo, como mostrado na Figura 10, 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 11, 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{Bx} é igual ao vetor \mathbf{Bn} .

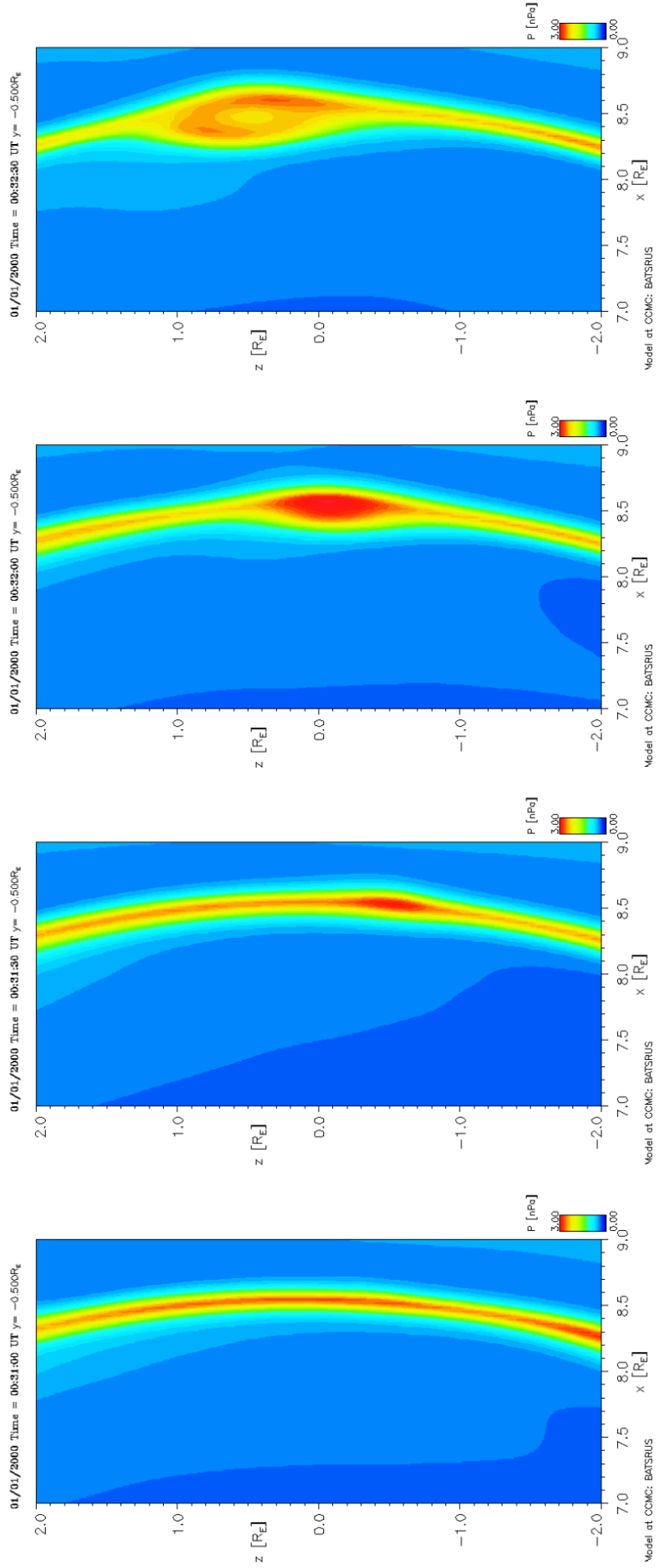


Figura 10: Gráfico da pressão ao longo do tempo no plano de corte $y=0.00$ do instante 31:00 até 32:30

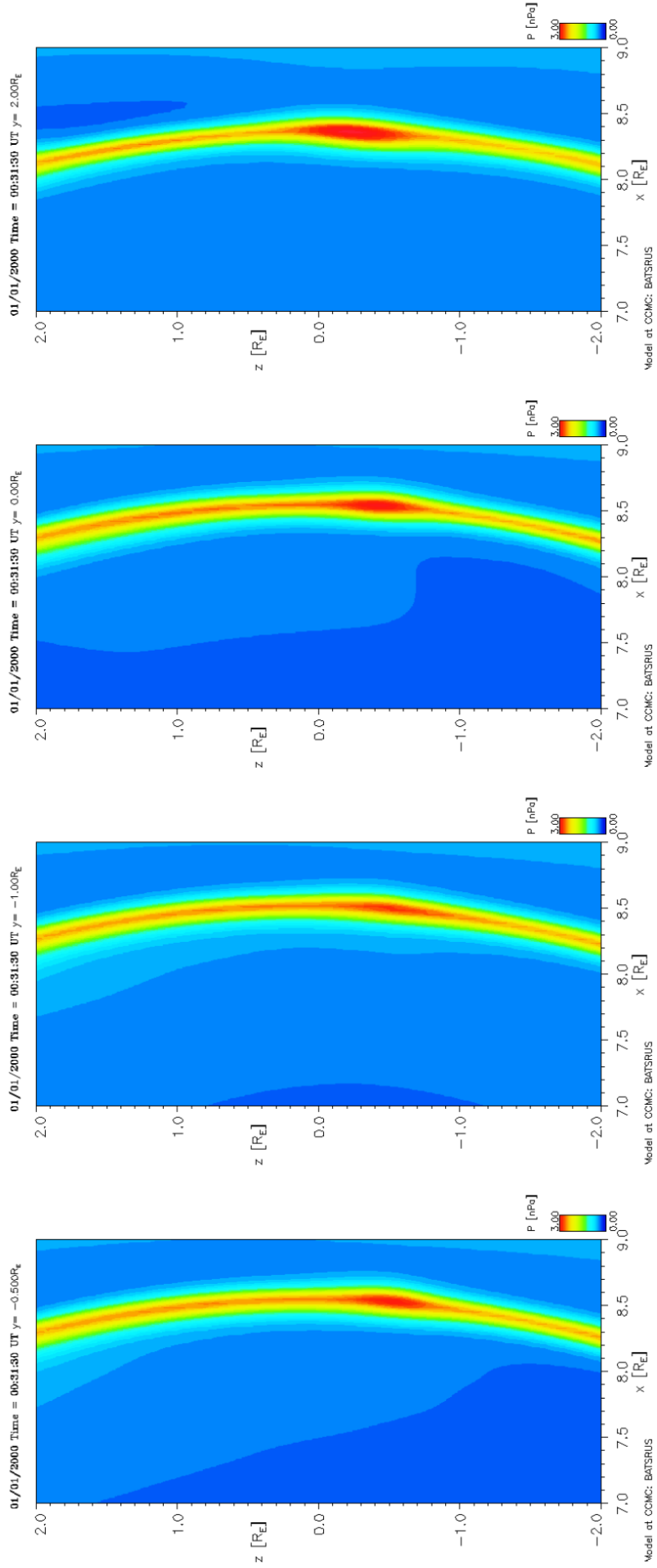


Figura 11: Gráfico da pressão no instante 31:30 nos planos de corte $y=-1$, $y=-0.5$, $y=0$ e $y=2$.

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 12, 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.

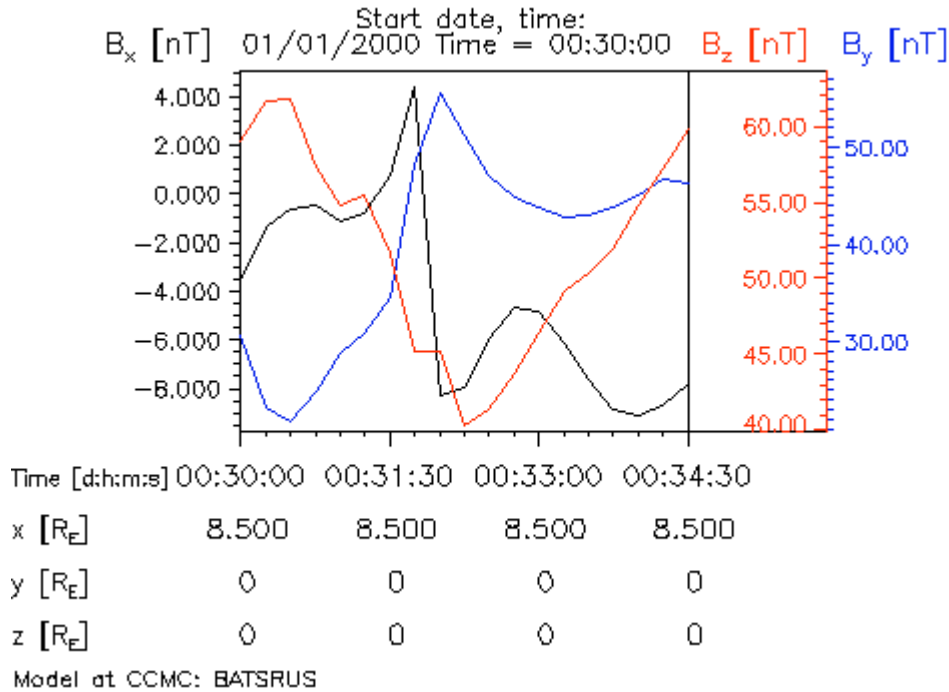


Figura 12: Gráfico da componente B_x , B_y e B_z fixado no ponto subsolar (8.5,0,0) ao longo dos instantes 30:00 e 34:30.

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 $y=-2 R_t$ à $y=2 R_t$, 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 13 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 14 e 15 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 13, os dados indicam que está ocorrendo um único ponto de reconexão em todos os planos xz analisados, sendo repetido esse padrão durante toda a ocorrência do FTE.

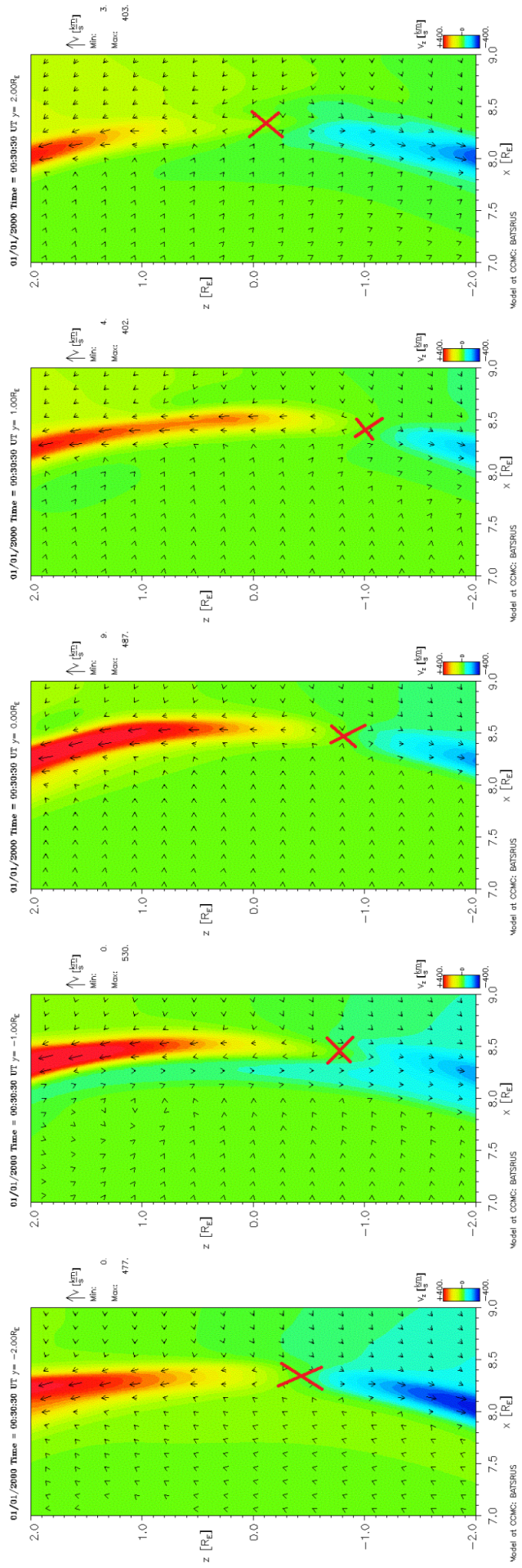


Figura 13: Gráfico da velocidade no instante 30:30, antes do FTE, nos planos de corte $y=-2$, $y=-1$, $y=0$ e $y=1$ e $y=2$

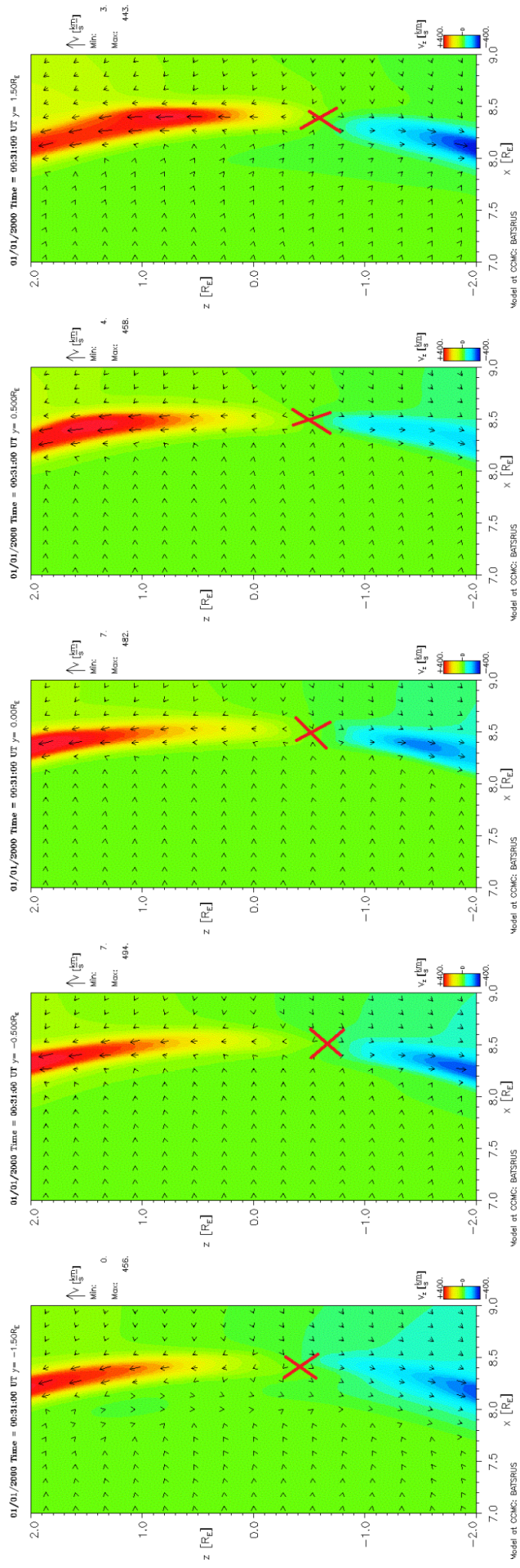


Figura 14: Gráfico da velocidade no instante 31:00, no início do FTE, nos planos de corte $y=-1.5$, $y=-0.5$, $y=0$ e $y=0.5$ e $y=1.5$

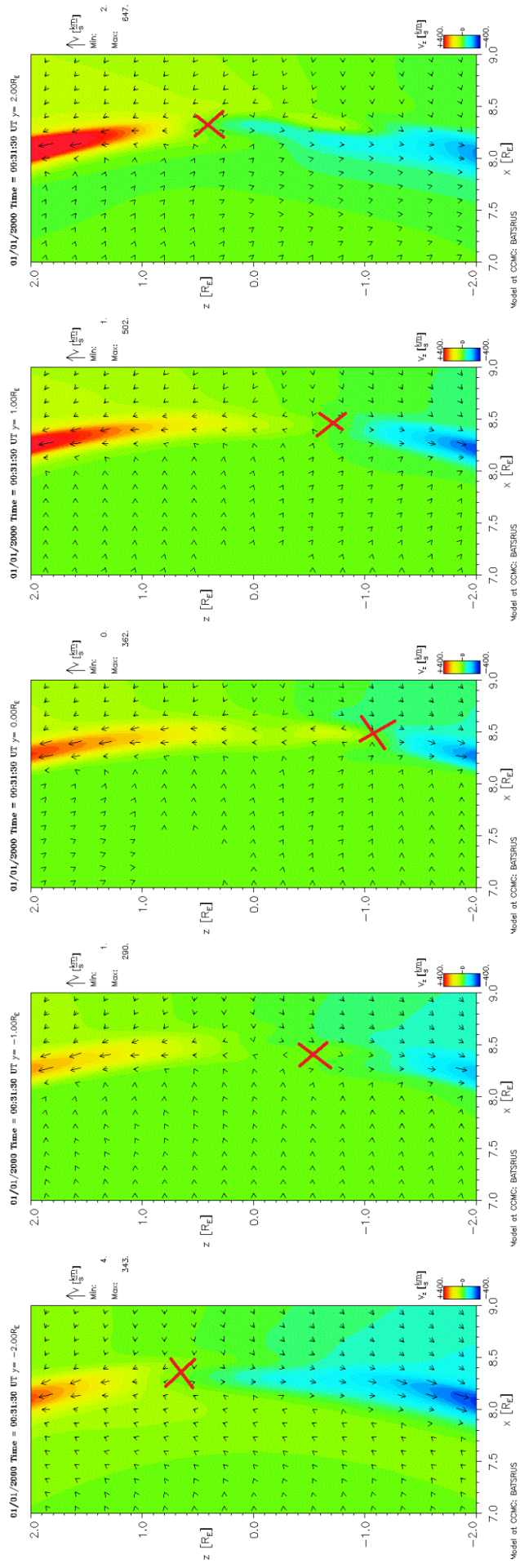


Figura 15: Gráfico da velocidade no instante 31:30, durante o FTE, nos planos de corte $y=-2$, $y=-1$, $y=0$ e $y=1$ e $y=2$

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 16 podemos ver precisamente onde acontece a reconexão no instante 31:00 em $y=0$. Foi possível identificar esse único ponto de reconexão em todos os planos analisados durante todo o período do FTE.

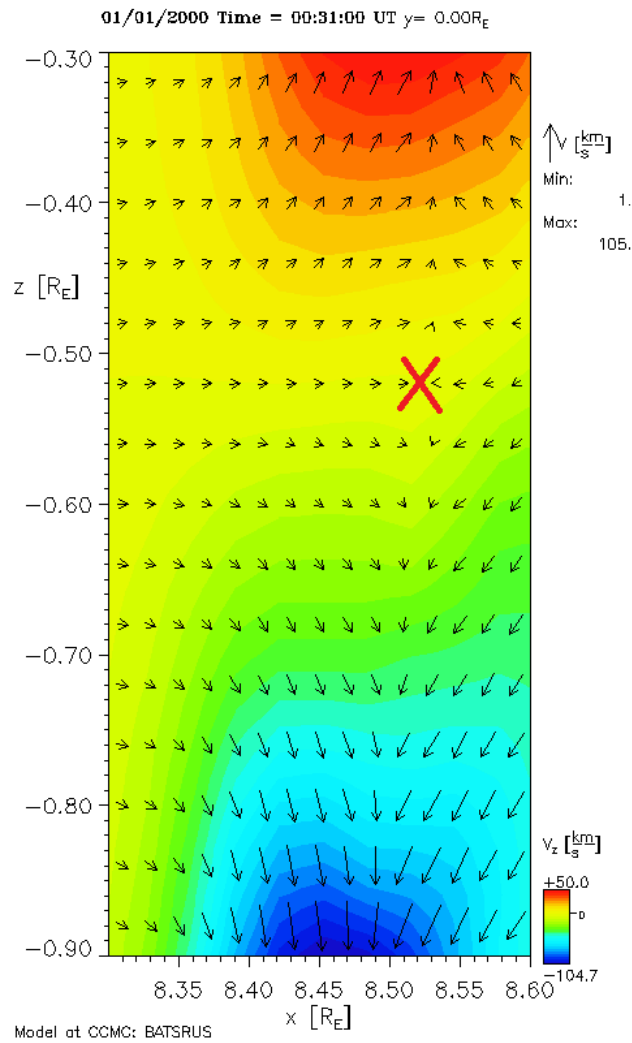


Figura 16: Gráfico da velocidade no instante 31:00 em $y=0$. A marca em vermelho indica exatamente a localização do ponto de reconexão.

O comportamento bipolar da componente normal à magnetopausa durante um evento de transferência de fluxo é 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 17 mostra a topologia magnética da magnetopausa em planos xz com $y=0$ R_t 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.

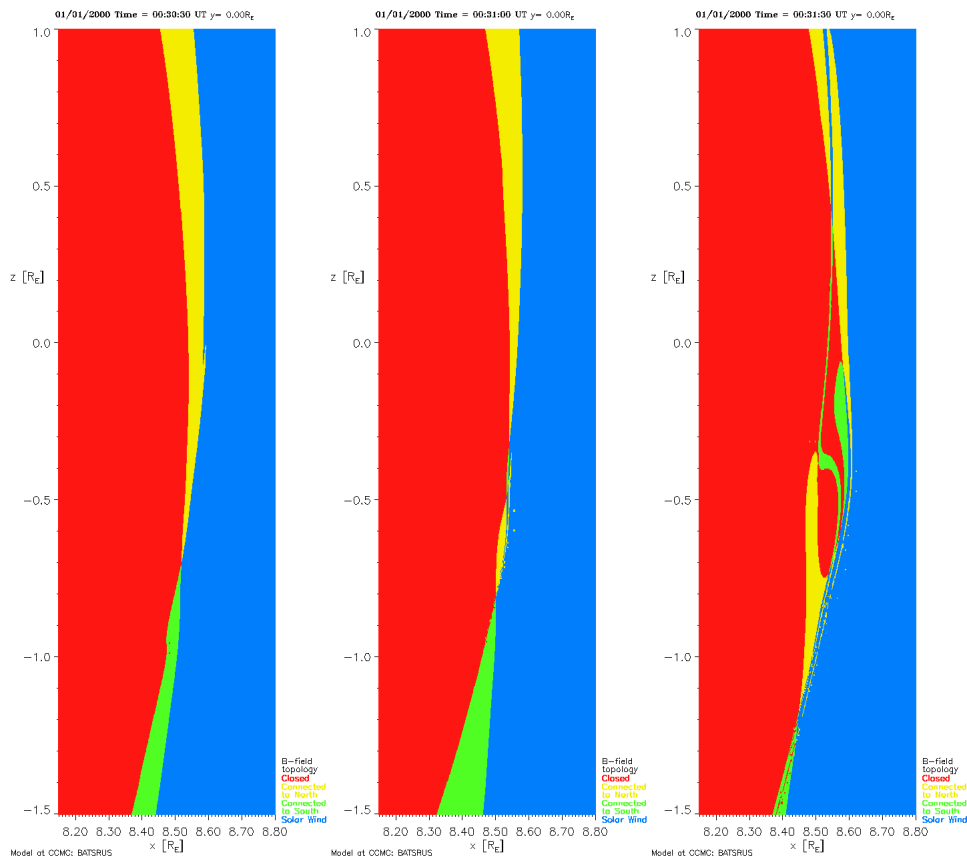


Figura 17: Topologia magnética da magnetopausa em planos xz com $y=0$ R_t nos instantes 30:30, 31:00 e 31:30.

A Figura 18 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.

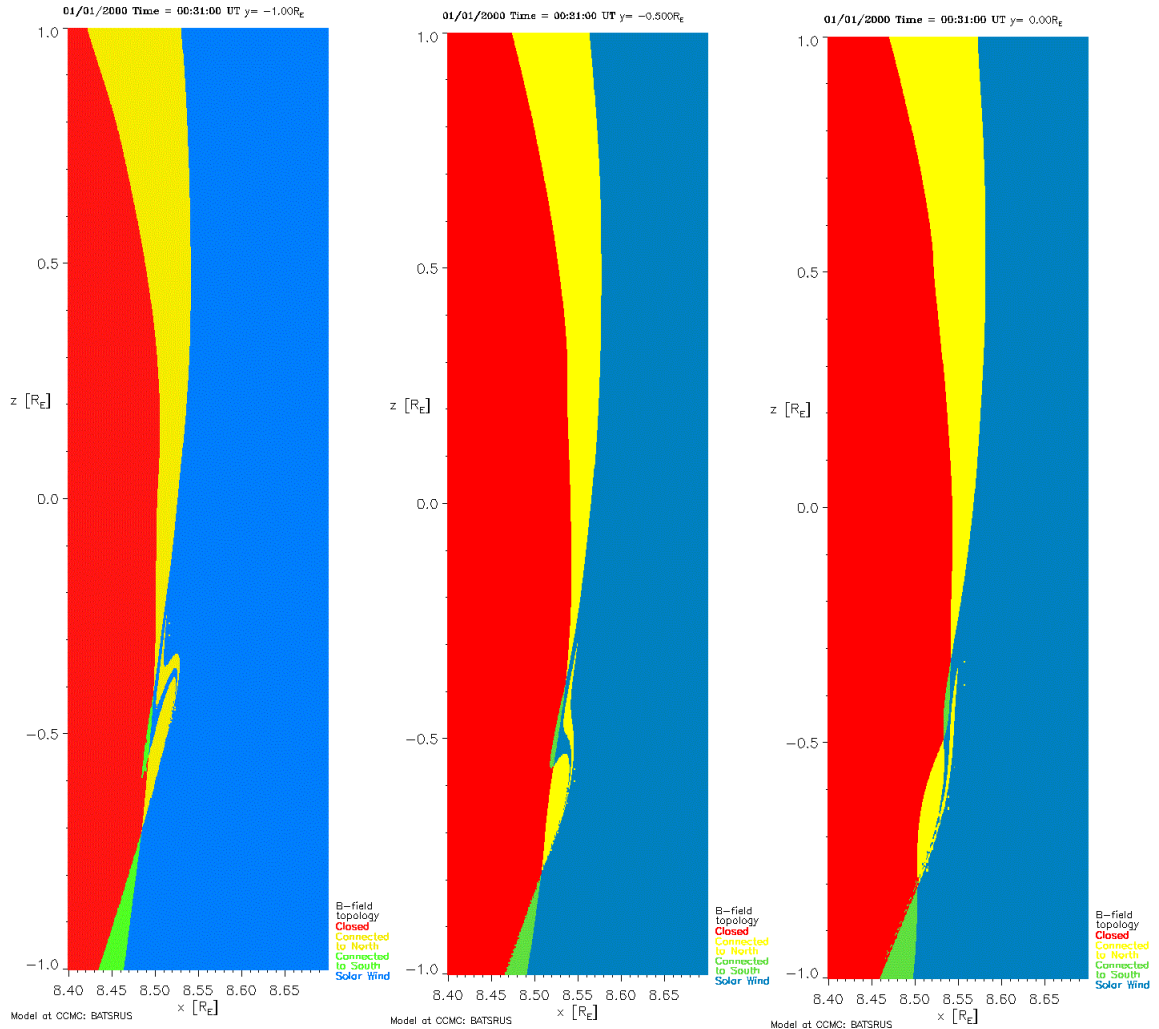


Figura 18: Topologia magnética da magnetopausa em planos xz com $y=-1$ R_t , $y=-0.5$ e $y=0$ no instante 31:00

A Figura 19 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 $y=0$ R_t 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.

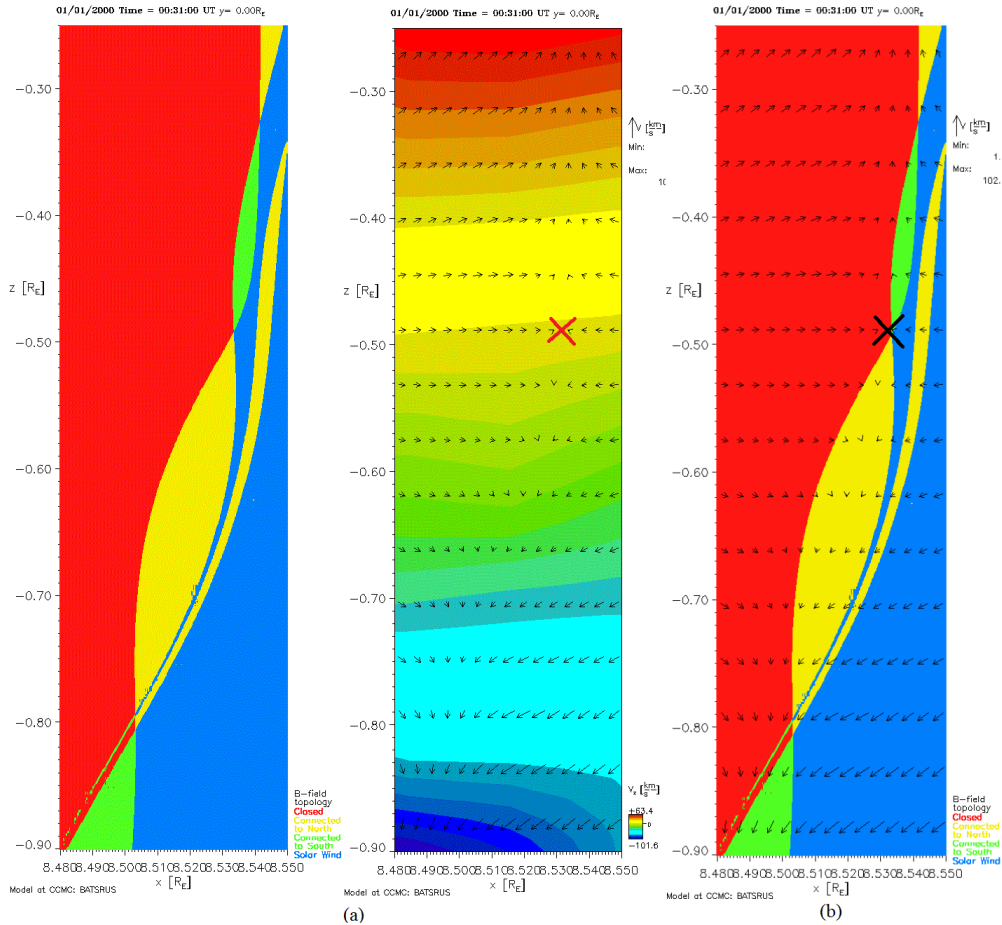


Figura 19: (a) Comparativo entre a topologia magnética e a velocidade nos instante 31:00 em $y=0$ Rt. (b) Sobreposição da topologia magnética com a velocidade nos instantes 31:00 em $y=0$ Rt.

Através da análise da topologia das Figuras 17, 18 e 19, 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, Birn e Schindler (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 20 mostra a estrutura dos tubos de fluxo proposta por Hesse, Birn e Schindler (1990), apresentando o mesmo corte transversal em y nos tubos analisados neste trabalho.

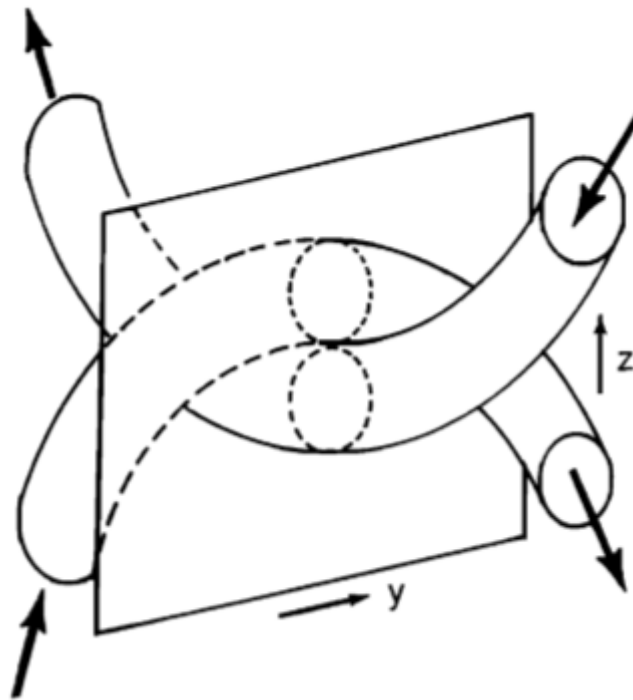


Figura 20: Representação dos tubos de fluxo interligados observados. Fonte: Hesse, Birn e Schindler (1990).

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 a análise de suas estruturas.

5 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, Birn e Schindler (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 e Elphic (1978), pelo formato dos tubos de fluxo, e Lee et al. (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, Birn e Schindler (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.

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, Birn e Schindler (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.

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. A missão espacial da NASA MMS (*Magnetospheric Multiscale Mission*), enviada com o intuito de obter dados para o estudo de como as linhas do campo magnético da Terra e do Sol conectam e desconectam, promete revolucionar as descobertas nessa área. Como trabalho futuro propõe-se a investigação mais aprofundada do FTE estudado neste trabalho e de outros eventos, utilizando outras ferramentas e dados observacionais, como, por exemplo, os futuros dados que a missão MMS proporcionará, para possibilitar uma melhor análise e descobertas sobre a formação, propagação e características dos FTEs.

6 Referências bibliográficas

CARDOSO, Flavia Reis et al. Magnetopause reconnection and interlinked flux tubes. *Annales Geophysicae*. [s. L.], p. 1853-1866. 30 out. 2013.

COSTA JUNIOR, E. et al. O vento solar e a atividade geomagnética. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, [s. L.], v. 33, p.1-8, 21 nov. 2011.

DING, D. Q.; LEE, L. C.; MA, Z. W. 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*, v. 96, n. A1, jan. 1991.

Dorelli, J. C., and A. Bhattacharjee (2009), On the generation and topology of flux transfer events, *J. Geophys. Res.*, 114, A06213, doi:10.1029/2008JA013410.

Dungey, J. W. Interplanetary Magnetic Field and the Auroral Zones. *Physical Review Letters*, v. 6, p. 47, 1961.

FEDDER, J. A.; SLINKER, S. P.; LYON, J. G.; RUSSELL, C. T. Flux transfer events in global numerical simulations of the magnetosphere. *Journal of Geophysical Research*, v. 107, n. A5, maio 2002. 22, 64, 65

Gonzalez, W. e Mozer, F.: A quantitative model for the potential resulting from reconnection with an arbitrary interplanetary magnetic field, *J. Geophys. Res.*, 79, 4186-4194, 1974.

Haerendel, G., Paschmann, G., Sckopke, N., Rosenbauer, H., e Hedgecock, P.: The frontside boundary layer of the magnetosphere and the problem of reconnection, *J. Geophys. Res.*, 83, 3195-3216, 1978.

Hesse, Michael; Birn, Joachim; Schindler, Karl. On the topology of flux transfer events. *Journal Of Geophysical Research*. Eua, p. 6549-6560. 1 maio 1990.

KOGA, Daiki. Estudo observacional da reconexão magnética na magnetosfera terrestre. São José dos Campos: Dge/cea/inpe, 2013. 25 slides, color. Disponível em: <http://www.las.inpe.br/ppci/welcome_arquivos/Daiki_Koga-CEA_dez2013.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2015.

KU, Hwar C.; SIBECK, David G.. Internal structure of flux transfer events

produced by the onset of merging at a single X line. *Journal Of Geophysical Research*. Eua, p. 2243-2260. 1 fev. 1997.

Kuznetsova, M., Hesse, M., Rastaetter, L., Taktakishvili, A., Toth, G., Zeeuw, D. L. D., Ridley, A., and Gombosi, T.: Multiscale modeling of magnetospheric reconnection, *J. Geophys. Res.*, 112, A10210, doi:10.1029/2007JA012316, 2007.

Lee, L. C. and Fu, Z. F.: A theory of magnetic flux transfer at the Earth's magnetopause, *Geophys. Res. Lett.*, 12, 105-108, 1985

Lee, L. C., Ma, Z., e Otto, A.: Topology of magnetic flux ropes and formation of fossil flux transfer events and boundary layer plasmas, *J. Geophys. Res.*, 98, 3943-3951, 1993.

Louarn, P., Federov, A., Budnik, E., Fruit, G., Sauvaud, J. A., Harvey, C. C., e Dandouras, I.: Cluster observations of complex 3D magnetic structures at the magnetopause, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L19805, doi:10.1029/2004GL020625, 2004

LUCAS, Aline. Estudo da dinâmica da corrente de anel durante a fase principal de supertempestades magnéticas. 2005. 256 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geofísica Espacial, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2005. Cap. 2.

Otto, A.: Forced three-dimensional magnetic reconnection due to linkage of magnetic flux tubes, *J. Geophys. Res.*, 100, 11863-11874, 1995.

Ridley, A. J., Gombosi, T. I., and DeZeeuw, D. L.: Ionospheric control of the magnetosphere: conductance, *Ann. Geophys.*, 22, 567-584, doi:10.5194/angeo-22-567-2004, 2004.

Paschmann, G., Haerendel, G., Papamastorakis, I., Sckopke, N., Bame, S., Gosling, J., e Russel, C.: Plasma and magnetic field characteristics of Magnetic Flux Transfer Events, *J. Geophys. Res.*, 87, 2159-2168, 1982.

PÉREZ, Germán Fariñas. Study of transient magnetic reconnection and its relation with the variability of the polar cap potential. 2014. 83 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geofísica Espacial, Departamento de Geofísica Espacial, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2014.

Powell, K., Roe, P., Linde, T., Gombosi, T., and Zeeuw, D. D.: A solution adaptive upwind scheme for ideal magnetohydrodynamics, *J. Comput. Phys.*, 154, 284–309, 1999.

RIBEIRO, Bárbara Abigail Ferreira. Estudo de reconexão magnética na magnetopausa terrestre utilizando dados do satélite polar. 2013. 61 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geofísica Espacial, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2013

Rijnbeek, R. e Cowley, S.: Magnetospheric flux erosion events are flux transfer events, *Nature*, 309, 135-138, 1984.

Russel, C. T. and Elphic, R. C.: Initial ISEE Magnetometer Results: Magnetopause observations, *Space Sci. Rev.*, 22, 681-715, 1978.

Sibeck, D., Kuznetsova, M., Angelopoulos, V., Glabmeier, K.H., and McFadden, J.: Crater FTEs: simulation results and THEMIS observations, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L17S06, doi:10.1029/2008GLO33568 2008.

SILVEIRA, Marcos Vinicius Dias. Estudo de eventos de transferência de fluxo utilizando dados dos satélites da missão Themis. 2011. 72 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geofísica Espacial, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2011. Cap. 2.

Southwood, D., Farrugia, C., and Saunders, M.: What are flux transfer events, *Planet. Space Sci.*, 36, 503-508, 1988.

Toth, G., Sokolov, I. V., Gombosi, T. I., Chesney, D. R., Clauer, C. R., De Zeeuw, D. L., Hansen, K. C., Kane, K. J., Manchester, W. B., Oehmke, R. C., Powell, K. G., Ridley, A. J., Roussev, I. I., Stout, Q. F. and Volberg, O., Wold, R. A., Sazykin, S., Chan, A., Yu, B., and Kóta, J.: Space weather modeling framework: a new tool for the space science community, *J. Geophys. Res.*, 110, A12226, doi:10.1029/2005JA011126, 2005.