

Análise da Interação entre o Vento Solar e a Magnetosfera da Terra e seus Efeitos em Impulsos Súbitos

Analysis of the Interaction between Solar Wind and Earth's Magnetosphere and Its Effects on Sudden Impulses

Amanda Resende Piassi^{*1,2}, Laysa Cristina Araújo Resende Chagas^{1,3},
Clezio Marcos Denardini¹, Rogério Hisashi Honda¹, Felipe Oliveira Tavares¹,
Vinicius Degeroni¹, Karen Júlia Coldebella Ferreira¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil.

²Instituto Federal de Minas Gerais, Arcos, MG, Brasil.

³China-Brazil Joint Laboratory for Space Weather, São José dos Campos, SP, Brasil.

Recebido em 02 de fevereiro de 2024. Revisado em 08 de agosto de 2024. Aceito em 09 de agosto de 2024.

O Sol emite continuamente um plasma conhecido como vento solar, que se propaga pelo espaço interplanetário. Esse plasma interage com o campo magnético da Terra (CMT), formando a magnetosfera, uma região onde diferentes tipos de plasma e correntes coexistem. Quando ocorre uma variação da pressão do vento solar, há uma compressão ou descompressão da magnetosfera, provocando alterações na corrente de Chapman-Ferraro na magnetopausa. Essas alterações geram um campo magnético que é percebido quase instantaneamente por magnetômetros instalados em satélites ou em observatórios terrestres através de um aumento repentino na componente H do campo geomagnético, denominado Impulso Súbito (SI, do inglês "Sudden Impulse"). Os SI, quando medidos em solo, apresentam morfologias e amplitudes diferentes, uma vez que também sofrem influência das correntes ionosféricas locais. Desta forma, o presente artigo revisa as principais teorias sobre o acoplamento vento solar-magnetosfera, considerando modelos e dados experimentais. Explora-se ainda a diversidade na morfologia dos SI medidos em solo. Os resultados obtidos destacam que, embora as bases físicas do acoplamento entre o vento solar e a magnetosfera estejam bem estabelecidas teórica e experimentalmente, alguns pontos continuam em discussão, tais como a influência da Anomalia Magnética da América do Sul nos SI.

Palavras-chave: Acoplamento vento solar-magnetosfera, Tempestades Geomagnéticas, Impulsos Súbitos.

The Sun continuously emits a plasma known as the solar wind, which propagates through interplanetary space. This plasma interacts with Earth's magnetic field (CMT), forming the magnetosphere, a region where different types of plasma and currents coexist. When there is a variation in solar wind pressure, the magnetosphere undergoes compression or decompression, causing changes in the Chapman-Ferraro current at the magnetopause. These changes generate a magnetic field that is perceived almost instantly by magnetometers installed on satellites or at ground observatories. Compression leads to a sudden increase in the H component of the geomagnetic field, known as a Sudden Impulse (SI). SIs, when measured on the ground, exhibit different morphologies and amplitudes, as local ionospheric currents also influence them. Thus, this paper reviews the main theories on solar wind-magnetosphere coupling, considering models and experimental data. It also explores the diversity in the morphology of ground-measured SIs. The results highlight that, although the physical foundations of the coupling between the solar wind and the magnetosphere are well-established both theoretically and experimentally, some points remain under discussion, such as the influence of the South Atlantic Magnetic Anomaly on SIs.

Keywords: Solar Wind-magnetosphere Coupling, Geomagnetic Storms, Sudden Impulses.

1. Introdução

O meio interplanetário é repleto de campos magnéticos e partículas transportadas pelo vento solar, que, ao interagirem com o campo magnético da Terra, formam um ambiente eletromagnético altamente dinâmico ao redor do planeta, denominado magnetosfera. Esse ambiente não é estático devido aos fenômenos físicos na superfície

do Sol, que geram alterações nas propriedades do plasma do vento solar, como velocidade, pressão, temperatura e campo magnético. Essas mudanças afetam a taxa de entrada de partículas na magnetosfera, podendo causar tempestades geomagnéticas. Um efeito visível dessas tempestades são as fascinantes auroras boreais, mas elas também podem afetar sistemas de comunicação, como os sistemas de navegação por satélite e redes de energia. Atualmente, a sociedade e a economia são extremamente dependentes dessas tecnologias; portanto,

*Endereço de correspondência: amanda.piassi@ifmg.edu.br

o monitoramento e a compreensão da interação Sol-Terra são fundamentais para mitigar os impactos desses eventos, assegurando a continuidade das operações tecnológicas essenciais [1–3].

Um ingrediente importante para a análise da interação eletromagnética do vento solar com a magnetosfera é a morfologia e as variações temporais rápidas do campo geomagnético principal da Terra. Esta contribuição para o campo magnético medido deve-se a campos magnéticos externos, gerados por correntes que fluem na ionosfera e na magnetosfera. A observação e análise das principais características dos campos geomagnéticos na superfície da Terra, juntamente com suas variações, permitem a elaboração de modelos e simulações para o mecanismo de interação Sol-Terra. As redes de magnetômetros em solo, juntamente com informações de plasma espaciais, possibilitam um estudo cada vez mais abrangente das interações entre o vento solar e a magnetosfera terrestre em diferentes escalas espaciais e temporais. Sabe-se, por exemplo, que a reconexão magnética é o fenômeno responsável pelo acoplamento entre o vento solar e a magnetosfera. Além disso, é possível observar que a magnetosfera responde globalmente a alterações de pressão do vento solar, conhecidas como Impulsos Súbitos (SI, do inglês *Sudden Impulses*) [4, 5].

Atualmente já dispomos de um monitoramento rigoroso e contínuo da coroa solar e dos parâmetros do vento solar. Em adição, também existem redes de magnetômetros instalados em solo que desempenham um papel fundamental no mapeamento do campo geomagnético. Uma rede mundial de magnetômetros, denominada InterMagnet, fornece dados geomagnéticos de alta qualidade de estações distribuídas internacionalmente. No contexto nacional, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) implementou a rede EMBRACE (Estudo e Monitoramento Brasileiro do Clima Espacial), que opera desde 2015. A EMBRACE consiste em uma série de instrumentos distribuídos em várias localidades no território brasileiro, dotadas de magnetômetros e outros dispositivos de monitoramento. Tal capacidade contribui para uma compreensão mais completa das variações magnéticas locais e seus efeitos na região brasileira [6–8].

Desta forma, este trabalho propõe uma revisão geral sobre acoplamento entre o vento solar e a magnetosfera, com destaque nos SI que ocorrem no CMT. A revisão considera ainda a diversidade na morfologia dos sinais magnéticos de SI medidos em solo, destacando a influência da Anomalia Magnética da América do Sul (SAMA, do inglês *South American Magnetic Anomaly*), que está presente em boa parte do território brasileiro. Para cumprir a proposta, o trabalho está organizado de maneira que, na seção 2, serão fornecidos detalhes teóricos sobre o plasma do vento solar e a magnetosfera. Na seção 3, realiza-se uma revisão dos fundamentos básicos da reconexão magnética. Em seguida, na seção 4, são apresentados os efeitos das tempestades magnéticas em dados medidos em solo para um evento ocorrido em 23 de maio de 2023. Na seção 5 são descritos os principais

mecanismos de geração e propagação dos SIs, bem como as diferenças morfológicas desses sinais medidos em solo. Para completar o estudo, na seção 6 é realizado um estudo de caso para avaliar a influência da SAMA nos sinais de SI. Por fim, na seção 7, são apresentadas as conclusões do trabalho.

2. Vento Solar e Magnetosfera

A atmosfera solar é constituída por três distintas camadas: a fotosfera, a cromosfera e a coroa. A coroa solar se estende mais externamente, sendo caracterizada por temperaturas extremamente elevadas. Essa camada libera continuamente matéria sob a forma de plasma, que preenche todo o espaço interplanetário, conhecido como o vento solar. Foi o astrofísico norte-americano Eugene Parker (1958) quem descreveu a teoria fundamental sobre o comportamento e expansão do vento solar. Em sua teoria o autor postula que o fenômeno é resultado da diferença de pressão entre a coroa solar e o espaço interplanetário [1, 9, 10].

Quando o vento solar incide e interage com o CMT, o plasma sofre uma desaceleração, tornando-se subsônico e flui ao longo dos flancos da magnetosfera. Essa incidência distorce o campo magnético terrestre, comprimindo-o na região frontal e criando uma longa cauda na região traseira, a qual é dado o nome de magnetosfera terrestre. A magnetosfera é um sistema dinâmico, o que significa que seus diferentes plasmas estão se movendo pela influência de forças externas. Seu interior e entorno podem ser segmentados em regiões com características físicas próprias, sendo subdivididas conforme a densidade e temperatura do plasma [1, 2, 11].

A morfologia da magnetosfera sob condições normais de vento solar é representada na Figura 1, obtida a partir do modelo de simulação BATSRUS (*Block-Adaptive-Tree Solar-wind Roe Upwind Scheme*) [12]. A figura mostra a bainha magnética na região frontal, formada logo após o choque do vento solar com o CMT. As linhas de campo magnético são destacadas em três cores: vermelho para linhas fechadas, cujas extremidades estão conectadas à Terra; verde para linhas abertas, que terminam na Terra; e azul para linhas magnéticas interplanetárias (IMF), provenientes da coroa solar e transportadas pelo plasma do vento solar sob a condição de linhas congeladas. A magnetopausa é a região que marca a transição no ambiente magnético da Terra, separando o plasma solar do CMT. Nessa fronteira, a pressão dinâmica do vento solar é equilibrada pela pressão do campo geomagnético, resultando na corrente de Chapman-Ferraro. Nas altas latitudes, temos as cúspides polares ao redor dos polos, onde as linhas de campo são verticais, facilitando a entrada de partículas eletricamente carregadas do vento solar na magnetosfera. No lado noturno da magnetosfera, a região da cauda compreende dois regimes magnéticos distintos chamados lóbulos da cauda, separados por uma espessa camada de

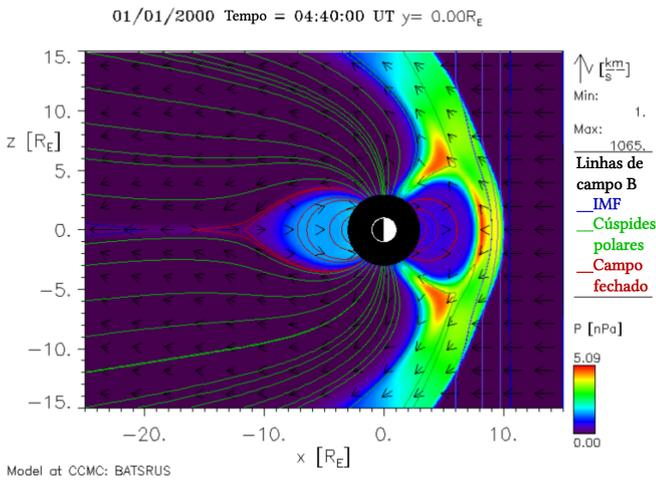


Figura 1: Configuração da magnetosfera obtida através do modelo BATSUS da NASA. A imagem está em uma perspectiva meridional, com o eixo Y = 0, abrangendo um intervalo de -25 a 15 Raios Terrestres. Utilizaram-se como parâmetros de entrada, condições de vento solar de velocidade $\mathbf{V} = V_s = -400$ km/s e de campo magnético interplanetário $\mathbf{B} = B_z = -5$ nT. As linhas de campo magnético (linhas de campo B) são coloridas para representar diferentes regiões: azul para o campo magnético interplanetário (IMF), verde para as cúspides polar polares, e vermelho para o campo fechado da Terra. A escala de cores indica a pressão do plasma, variando de roxo (baixa pressão) a vermelho (alta pressão), com valores entre 0.00 a 5.09 nPa. Setas pretas mostram a direção e magnitude do vento solar, com a velocidade indicada em km/s. A magnetopausa, a fronteira onde a pressão do vento solar e a pressão do campo magnético terrestre se equilibram, é visível como a região de mudança na densidade do plasma e direção das linhas de campo magnético, situada entre 10 a 15 raios terrestres (R_E) à frente da Terra. As cúspides polares mostram áreas onde as linhas do campo magnético se estendem dos polos, enquanto as áreas de campo fechado mostram linhas que retornam à Terra sem se reconectar com o campo interplanetário [12].

plasma neutro conhecida como lâmina de plasma neutra, onde ocorre uma rápida reversão na direção do campo magnético. A região mais interna da magnetosfera é a plasmasfera, que co-rota com a Terra e é preenchida com plasma denso e frio de origem ionosférica [1, 2, 13].

3. Reconexão Magnética

Ao se propagar pelo espaço, o vento solar transporta o IMF obedecendo um fenômeno físico conhecido como congelamento das linhas de campo em um plasma. Essa condição é explicada por meio da teoria Magneto-Hidrodinâmica (MHD), que trata o plasma como um fluido contínuo. A abordagem MHD acopla as leis de conservação de massa, momento e energia com as equações de Maxwell [14].

Para descrever esse fenômeno, considera-se a Lei de Faraday, que determina a evolução temporal do campo de indução magnética \mathbf{B} em relação à variação do campo

elétrico \mathbf{E} , expressa por:

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -\nabla \times \mathbf{E}, \tag{1}$$

onde o campo elétrico, \mathbf{E} é obtido pela lei de Ohm generalizada

$$\mathbf{E} = -\mathbf{v} \times \mathbf{B} + \mathbf{R}, \tag{2}$$

sendo o termo \mathbf{R} as contribuições para o campo elétrico presente no plasma devido aos efeitos resistivos.

É importante ressaltar que em um plasma perfeitamente condutor, como o vento solar, pode-se considerar $\mathbf{R} \approx 0$. Assim a Equação 1 se reduz a uma equação de convecção, representada a seguir:

$$\partial \mathbf{B} / \partial t = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \tag{3}$$

A Equação 3 considera que os elementos de plasma do vento solar permanecerão conectados a mesma linha de campo enquanto se propaga pelo meio interplanetário, ou seja: congelados no plasma [14].

Quando o vento solar incide sobre a magnetosfera, os dois plasmas interagem de tal forma que suas respectivas configurações magnéticas se tornam interconectadas. Esse processo cria uma espécie de “portal” que permite que a energia do sistema, inicialmente armazenada no campo magnético, seja convertida em energia cinética e energia térmica. Nesse processo, denominado de reconexão magnética, ocorre uma espécie de rearranjo das linhas de campo magnético dos dois plasmas. Apesar de ser um fenômeno complexo, a descrição qualitativa do processo de reconexão é tal que linhas de campo magnético de diferentes domínios magnéticos são ligadas umas às outras, alterando seus padrões de conectividade em relação às fontes [15, 16].

A Figura 2 possibilita explicar simplificadaamente o modelo da reconexão magnética. Nesta figura observa-se um plasma em duas dimensões, representado por um plano, onde as linhas de campo magnético estão inicialmente dispostas na mesma direção e sentido contrário umas das outras. O plasma está se movendo de forma que as linhas de campo se aproximam. Conforme vão se aproximando, elas exercem pressão uma sobre a outra. Quando essa pressão magnética se torna suficientemente intensa, as linhas de campo magnético se rearranjam, em seguida, se reconectam, formando uma “zona de difusão” (representada pelo retângulo em azul) nesta região a resistividade do plasma se torna importante, quebrando a condição de plasma ideal (MHD). A região onde ocorre a reconexão é caracterizada por um campo magnético nulo e presença de corrente elétrica denominada por linha-X ou linha de reconexão, que, na magnetosfera, é influenciada pela direção do campo magnético interplanetário [15, 17]. Alguns modelos sugerem a existência de uma única linha-X enquanto outros sugerem que existam de múltiplas linhas-X [15, 18–20].

As investigações sobre a reconexão magnética na magnetopausa da Terra tiveram início com o trabalho

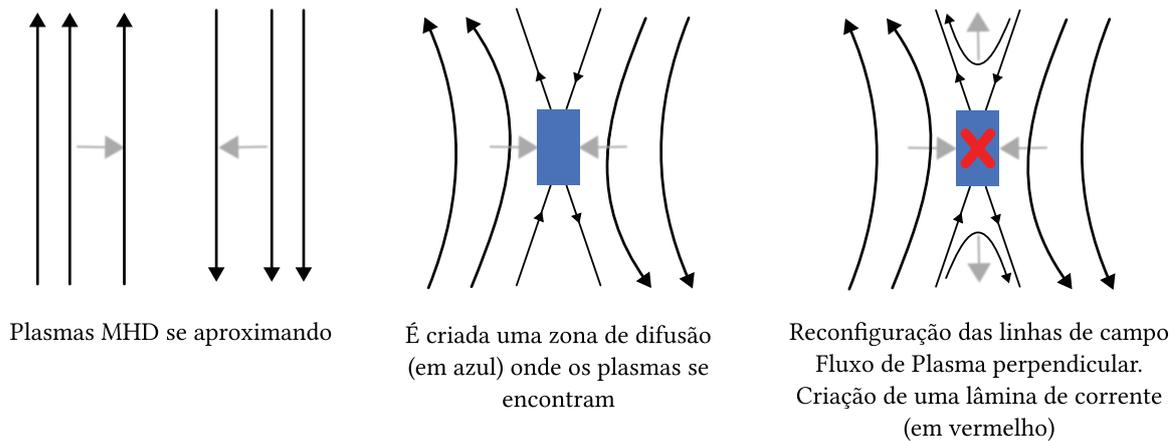


Figura 2: Representação simplificada do processo de reconexão magnética. Na figura a esquerda, observa-se dois plasmas com suas respectivas linhas de campo magnético aproximando-se. Em um segundo estágio, quando essas linhas se cruzam, uma zona de difusão é formada. Por fim, a direita, as linhas de campo são reconfiguradas, resultando em um fluxo de plasma e na formação de uma lâmina de corrente ilustrada pelo X em vermelho, entrando no plano. Adaptada de Genestreti (2012) [21].

pioneiro de Dungey (1961) sobre o papel dos campos magnéticos nulos na aceleração das partículas aurorais [17]. Segundo o autor, e como pode ser observado no esquema da Figura 3, quando o IMF está puramente orientado para o sul, a condição de congelamento do plasma é quebrada, permitindo que o vento solar se conecte ao campo geomagnético em uma pequena região da magnetopausa subsolar terrestre. Isso marca o início da primeira reconexão magnética, gerando um campo elétrico de convecção na direção amanhecer-entardecer. Esse campo elétrico age sobre o plasma, que flui em direção à cauda da magnetosfera. Na magnetocauda, ocorre um ponto onde os campos magnéticos têm orientações antiparalelas, desencadeando um segundo processo de reconexão magnética. Essa reconexão permite que o

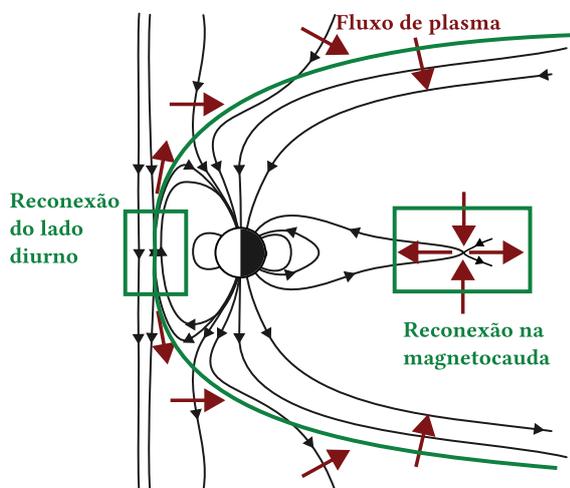


Figura 3: Ilustração de reconexão e convecção de plasma na magnetosfera concebida por Dungey (1961). Exemplifica os processos de convecção magnetosférica devido ao acoplamento IMF-Magnetosfera. Adaptada de M. Kivelson and C. Russell (1995) [2].

fluxo de plasma do vento solar penetre nas regiões internas da magnetosfera, completando o fenômeno que ficou conhecido como ciclo de Dungey [17].

Para visualizar as correntes resultantes dos processos de reconexão mencionados anteriormente conduziu-se uma simulação adicional utilizando o modelo BATSRUS, apresentada na Figura 4(a) e (b) [12]. Na Figura 4(a), destaca-se a presença de uma corrente significativa gerada na região de choque, bem como a corrente na magnetopausa. Na região da cauda, também é visível uma lâmina de corrente (em azul mais claro), formada pela reconexão magnética da cauda, conforme proposto no modelo de Dungey (1961). A Figura 4(b) exibe as mesmas correntes da simulação, mas agora em um corte equatorial com o eixo $Z = 0$. Nesta figura, torna-se evidente a extensão das correntes de cauda nas direções Y e X, sendo de aproximadamente 30 e 40 Raios Terrestres (R_E), respectivamente.

4. Tempestades Geomagnéticas e Seus Efeitos em Impulsos Súbitos Medidos em Solo

A atmosfera solar é marcada por intensa atividade magnética, resultante da dinâmica convectiva no interior do Sol, que pode gerar regiões de polaridade magnética opostas. Associadas à estrutura dipolar das manchas solares, existem loops magnéticos na atmosfera solar. A complexidade e a dinâmica desses loops são responsáveis pela reconexão e liberação da energia magnética durante as erupções solares. A energia liberada aquece o plasma e acelera as partículas, que interagem com o ambiente, produzindo radiação. Às vezes, uma ejeção de massa coronal (CME, do inglês *Coronal Mass Ejection*) está associada, o que significa que grandes quantidades de matéria solar e campos magnéticos também são expelidos para o espaço [3].

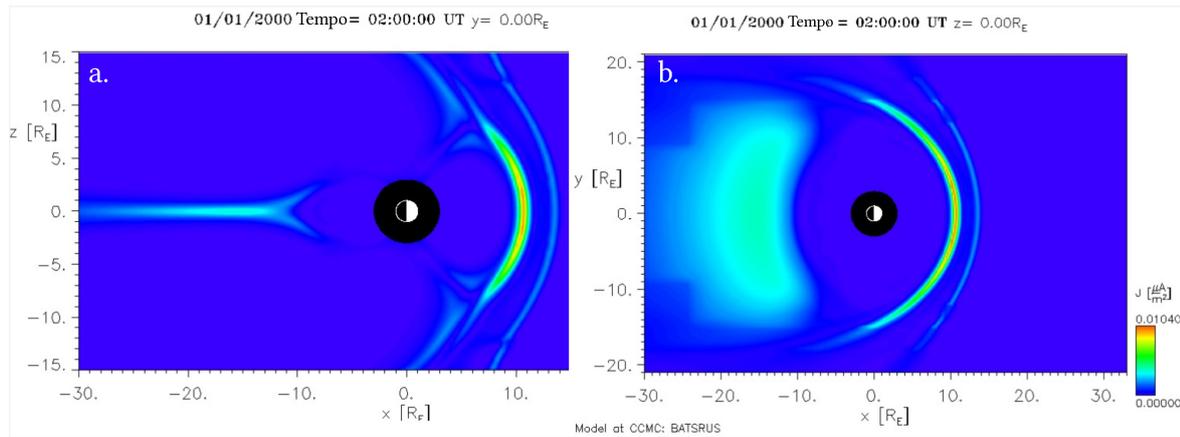


Figura 4: Simulação feita com o modelo BATSRUS das correntes magnetosféricas. Utilizou-se como parâmetros de entrada condições de vento solar, de velocidade $\mathbf{V} = V_s = -400 \text{ km/s}$ e de campo magnético interplanetário $\mathbf{B} = B_z = -5nT$. (a) perspectiva meridional da magnetosfera, com o eixo $Y = 0$ (b) corte equatorial, com eixo $X = 0$. (J), representada em unidade de micro ampere por metro quadrado ($\mu A/m^2$) e a Terra é representada pelo círculo [12].

A interação de uma CME com a magnetosfera terrestre tem o potencial de modificar as taxas de reconexão na magnetopausa, resultando na injeção adicional de energia na magnetosfera. Esse fenômeno desencadeia as tempestades geomagnéticas [2]. A identificação dessas tempestades ocorre por meio da utilização de observações de variações nos parâmetros do meio interplanetário, juntamente com instrumentos instalados em solo. Como mencionado anteriormente, os impactos das tempestades magnéticas são diversos, manifestando-se por auroras mais intensas nos polos do planeta, distúrbios na ionosfera, correntes elétricas induzidas no solo e alteração das componentes do CMT devido às mudanças nos sistemas de correntes globais e locais [1, 2].

A Figura 5 ilustra uma tempestade geomagnética ocorrida em 23 de março de 2023. O gráfico (a) dessa figura apresenta o índice SYM-H (*Symmetric H-component*), onde H refere-se à componente horizontal do campo magnético terrestre, e “*Symmetric*” indica a consideração da simetria em relação ao equador magnético. O índice SYM-H mede a variação simétrica da componente horizontal do campo magnético durante tempestades geomagnéticas, fornecendo informações sobre a intensidade global desses eventos. Os gráficos (b), (c), (d) e (e) mostram os parâmetros físicos de velocidade, densidade, componente Z do IMF e pressão do plasma do vento solar, respectivamente (obtidos em <https://omniweb.gsfc.nasa.gov>). Esses dados, em conjunto, indicam a ocorrência de uma tempestade geomagnética que começou entre as 12h e 18h do dia 23 de março de 2023. A tempestade inicia-se com um Impulso Súbito (SI), que pode ser observado pela variação abrupta no índice SYM-H e nas medições de densidade e pressão do vento solar, explicitado na figura pela linha azul vertical pontilhada.

A resposta do CMT nessa tempestade pode ser observada por meio de magnetômetros instalados em qualquer

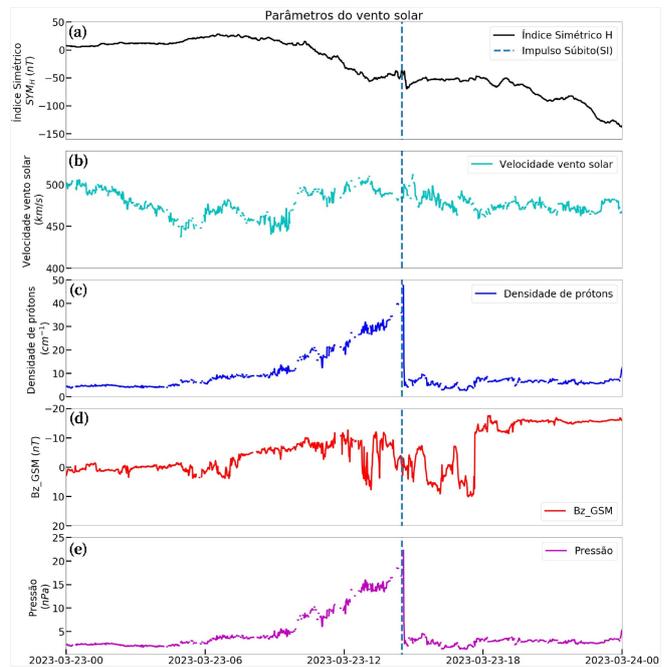


Figura 5: Parâmetros do (a) índice SYM (b) Velocidade do vento Solar (c) Densidade do vento solar (d) Componente Z do campo magnético (e) Pressão do vento solar para o dia 23 de março de 2023.

ponto do planeta. Um exemplo é ilustrado na Figura 6, que mostra a variação normalizada da componente H do campo magnético, coletada por magnetômetros localizados em diversas cidades brasileiras, incluindo São Martinho da Serra (ARA), Cachoeira Paulista (CXP), Jataí (JAT), e Porto Velho (PVE), todos integrantes do programa EMBRACE (<https://www2.inpe.br/cli/maespacial/portal/variacao-de-h/>). Observa-se ainda que, apesar de a tempestade ocorrer simultaneamente em todas as estações, as variações da componente H

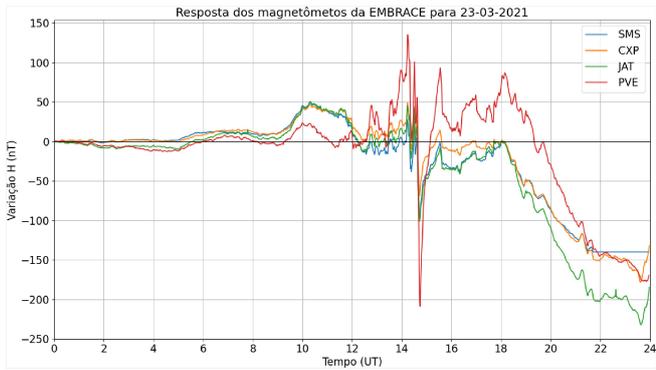


Figura 6: Resposta dos magnetômetros da EMBRACE para a tempestade geomagnética ocorrida em 23 de março de 2023.

apresentam módulos diferentes nas estações. Isso ocorre devido à presença de fenômenos aeronômicos locais, que geram campos magnéticos secundários.

5. Geração e Propagação dos SI

Desde o começo das medições, a comunidade científica se interessou pelo fato de que os SIs eram registrados quase simultaneamente em magnetômetros de todo o

mundo. Dessa forma, a teoria sobre a geração e a propagação desses sinais foi estudada e descrita já na década de 60 por Nishida et al. (1962). Segundo o autor, o SI é uma resposta à compressão ou descompressão da magnetosfera, resultante da variação da pressão do vento solar [22].

Russell et al., em 1978, constataram empiricamente que a amplitude do SI medida em satélites é proporcional à raiz quadrada da pressão do vento solar ($\sqrt{P_{SW}}$), sendo a constante de proporcionalidade dependente da localização da medição [23, 24]. Apesar de a morfologia e amplitude dos SIs medidos em satélites estarem bem definidas do ponto de vista teórico e experimental, os dados de SIs em solo apresentam maior complexidade de interpretação. Isso ocorre pelo fato de que essas medidas sofrem influências de sistemas de correntes ionosféricas locais, como, por exemplo, eletrojatos, correntes diurnas, anomalias e outros fenômenos aeronômicos.

A Figura 7 mostra um exemplo da diferença morfológica dos sinais medidos em estações de altas e baixas latitudes. Os painéis (a), (b), (c) e (d) mostram a variação da componente H do campo para as estações Guimar-Tenerife (GUI), onde o SI ocorreu no horário local HL = 16:30, Nagycenk (NCK) (HL = 18:49), Victoria (VIC) (HL = 9:07) e Narsarsuaq (NAQ) (HL = 14:54), respectivamente. É possível observar que a componente H apresenta uma variação simultânea em

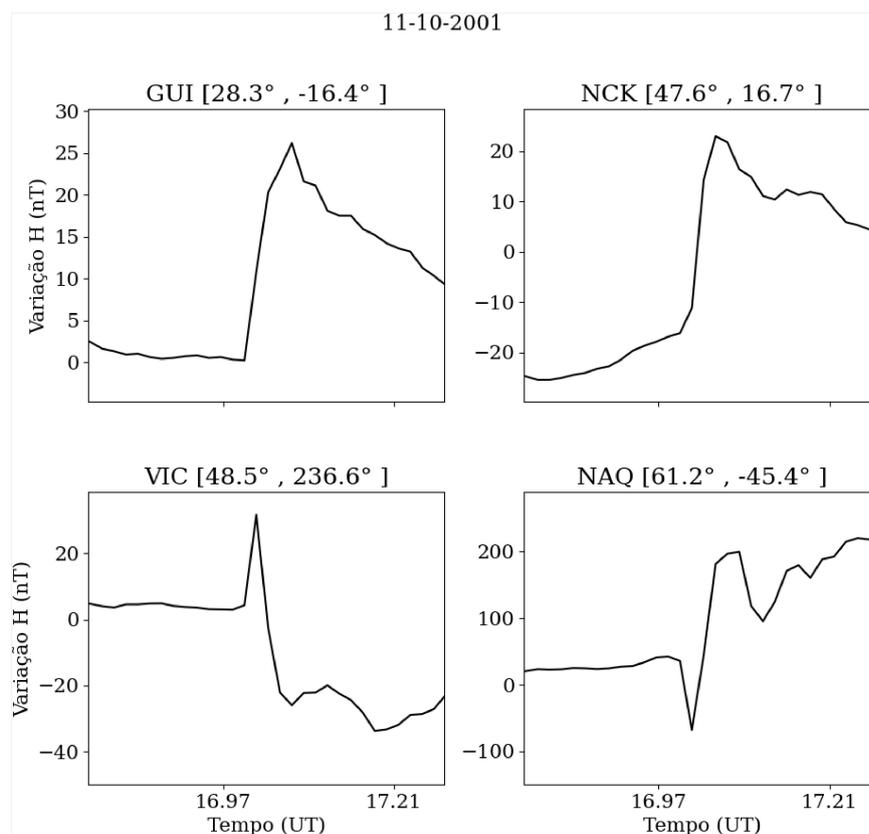


Figura 7: Variação do componente horizontal do campo magnético (H) em função do tempo (UT) em 11 de outubro de 2001 para quatro estações magnéticas: GUI [28.3°, -16.4°], NCK [47.6°, 16.7°], VIC [48.5°, 236.6°] e NAQ [61.2°, -45.4°].

todas as estações. Entretanto, nas estações de latitudes mais baixas, o sinal corresponde a um pico principal (MI do inglês *Main Impulse*), enquanto nas estações de latitudes mais altas, além do MI, observa-se um Impulso Preliminar (PI, do inglês *Preliminary Impulse*). Podemos observar ainda nos painéis (c) e (d) que o PI pode ser positivo ou negativo, dependendo da hora local em que o evento ocorreu.

Para explicar essas alterações, Araki (1977) desenvolveu um modelo físico para geração e propagação dos SIs. Segundo o autor, o aumento da pressão do vento solar e de uma componente $-B_z$ no IMF, aumenta a taxa de reconexão, gerando um aumento na intensidade da corrente de Chapman-Ferraro na magnetopausa. Essa corrente, por sua vez, gera um campo magnético B_z positivo que se sobrepõe ao campo magnético principal, causando assim os SIs [25, 26].

Araki (1977) sugeriu que, em solo, o Impulso Súbito pode ser decomposto em duas partes: $SI = DL + DP$. Essa decomposição consiste em: (a) uma resposta da magnetosfera que domina em baixas latitudes (DL, do inglês *Disturbance Low*) e (b) DP (do inglês *Disturbance Polar*), caracterizado por dois pulsos (PI + MI) de resposta na ionosfera, que predominam em latitudes aurorais. O componente DL é gerado pela corrente de Chapman-Ferraro na magnetopausa, enquanto o componente DP é gerado por correntes nos polos, transmitidas através das Correntes Alinhadas de Campo (FACs, do inglês *Field-Aligned Currents*). O PI (*Precursor Impulse*) é o primeiro pulso que ocorre em resposta à compressão inicial da magnetosfera pela onda de choque do vento solar. Ele é rapidamente seguido pelo MI (*Main Impulse*), que é o pulso principal resultante da estabilização da nova configuração do campo magnético após a compressão inicial. Juntos, esses pulsos refletem a complexa interação entre o vento solar e a ionosfera, especialmente em regiões de alta latitude [17, 25, 26].

A Figura 8 apresenta uma representação esquemática das correntes ionosféricas e das Correntes Alinhadas ao Campo (FACs) associadas. As FACs na região polar são alimentadas por dois sistemas de corrente principais: as correntes de Chapman-Ferraro (Região 2) e as correntes anelares (Região 1). Na Região 1, as correntes entram no lado do entardecer e saem no lado do amanhecer da calota polar. Ao chegarem na ionosfera polar, essas correntes geram diferenças de potenciais elétricos que acionam as correntes ionosféricas de Hall, com sentido anti-horário no setor da manhã e horário no setor da tarde. Isso explica a formação de dois pulsos em estações de latitudes mais altas e a inversão deles entre os setores diurno e noturno. Além disso, o circuito de corrente é fechado pelas correntes de Pedersen em latitudes médias, reforçadas pela contribuição das correntes penetradas de Pedersen. A interação dessas correntes cria uma configuração complexa de circulação elétrica na ionosfera, influenciada pela entrada e saída das correntes alinhadas ao campo nas regiões de alta latitude [25–28].

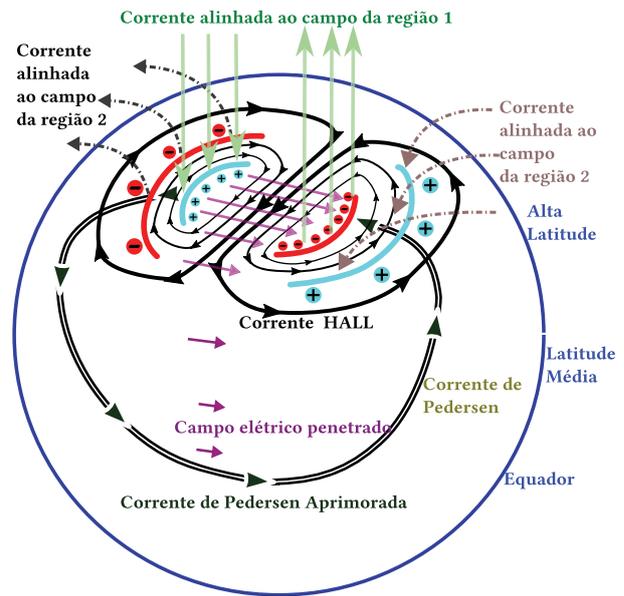


Figura 8: Figura esquemática do sistema de correntes ionosféricas, o qual consiste em uma corrente Hall em altas latitudes e uma corrente Pedersen intensificada pelo efeito Cowling no equador. A corrente Hall fecha o circuito na ionosfera, mas a corrente Pedersen conecta a fonte de corrente magnetosférica via as correntes alinhadas ao campo da Região 1. A corrente da Região 2 também está indicada, a qual poderia causar um efeito de blindagem na propagação dos campos elétricos. Adaptado de Kikuchi (1996) [5].

Segundo Kikuchi (1978), essas correntes de Hall são transportadas por meio de um guia de ondas com uma velocidade próxima a da luz, denominado TM_0 (do inglês, *Transverse Magnetic mode*), que explicaria a simultaneidade dos sinais. É importante destacar também que as correntes de Hall decrescem a sua intensidade devido à atenuação geométrica dos campos elétricos (mostrados em roxo na Figura 8) resultando em uma rara ocorrência de PI em baixa latitude, ou seja: o SI na componente H em baixas latitudes é basicamente o DL [27].

Uma formulação matemática da formação e propagação de ondas na magnetosfera foi dada por Tamao (1964) [29], a partir da equação 4 abaixo:

$$\nabla^2 \mathbf{A} - \frac{1}{V_A^2} \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial t^2} = -\frac{\mu_0}{B^2} \mathbf{F} \times \mathbf{B} \quad (4)$$

em que \mathbf{F} e \mathbf{A} e V_A se referem a força externa, o vetor de potencial magnético e a velocidade de Alfvén, respectivamente e μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo. A equação 4 demonstra que a força externa faz com que sejam criadas correntes $\mathbf{F} \times \mathbf{B}/B^2$ fluindo para leste na magnetopausa, criando o potencial \mathbf{A} dentro da magnetosfera.

Desenvolvendo a equação 4, se chega à constatação de que as ondas se propagam em dois modos: compressional

e transverso (ou modo de Alfvén), descritos respectivamente pelas equações 5 e 6 abaixo:

$$\left(\nabla^2 - \frac{1}{V_A^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) \nabla_z \times \mathbf{A}_\perp = -\frac{\mu_0}{B^2} \nabla_z \times (\mathbf{F} \times \mathbf{B}) \quad (5)$$

$$\left(\frac{\partial^2}{z^2} - \frac{1}{V_a^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) \nabla \cdot \mathbf{A}_\perp = -\frac{\mu_0}{B^2} \nabla \cdot (\mathbf{F} \times \mathbf{B}) \quad (6)$$

A equação 5 descreve a onda compressional isotrópica que provoca um aumento do campo magnético paralelo $\mathbf{B}_z = \nabla_z \times \mathbf{A}_\perp$ no sentido da Terra e é o sinal de SI medido em médias e baixas latitudes. Já as ondas transversais, também conhecidas como ondas de Alfvén transportam potenciais elétricos e as FACs para a ionosfera polar [29].

6. Estudo de Caso

Embora as principais variações na morfologia dos Impulsos Súbitos (SI) medidos em solo estejam bem explicadas pelo modelo de Araki (1997), existem outros tipos de alterações nesses sinais que ainda não estão bem compreendidos. O campo geomagnético quando medidos em solo pode ser influenciado por diversos fenômenos desde correntes ionosféricas a mudanças topológicas do campo. Na América do Sul, por exemplo, temos a Anomalia Magnética da América do Sul (SAMA), uma região onde, a intensidade total do campo é excepcionalmente baixa. Lá, a intensidade do campo atinge menos de 60% da intensidade do campo em latitudes comparáveis [1].

A fim de analisar com mais detalhes a influência da SAMA nos SIs, realizamos uma comparação do mesmo evento entre quatro estações de magnetômetros instaladas em pontos com o mesmo valor de L-Shell (ou seja, na mesma linha de campo magnético) para o evento de 23 de março de 2023. É interessante utilizar estações de magnetômetros localizadas em regiões magneticamente conjugadas, pois isso permite estudar como o campo magnético varia ao longo da mesma linha de campo geomagnético. Isso é útil para entender como variações locais, como as causadas pela SAMA, influenciam as medições do campo magnético.

Especificamente, comparamos a estação brasileira de São Martinho da Serra (SMS) ($29,4^\circ S, 53,8^\circ O$) com a estação de San Juan (SJG) ($18,1^\circ N, 66,1^\circ O$) localizada na Costa Rica, ambas com L-shell próximos a 1,28. Também incluímos as estações de Guimar (GUI) ($57,0^\circ N, 25,4^\circ L$) e Ascension Island (ASC) ($7,9^\circ S, 14,4^\circ O$), ambas com L-shell próximos a 1,12. A Figura 9 mostra os resultados obtidos. Podemos identificar nos dados variações do campo que configuram uma SI, entre as 12h e 16h. Observa-se uma forte amplificação na estação de SMS (destacada em azul), posicionada no centro da SAMA em relação a sua conjugada. Em contrapartida, nas outras duas estações conjugadas, essa amplificação não é observada. Também percebe-se uma significativa alteração morfológica desses sinais.

Essa amplificação pode indicar a existência de correntes ionosféricas extras que estão gerando um campo magnético adicional em SMS. Diversos autores têm

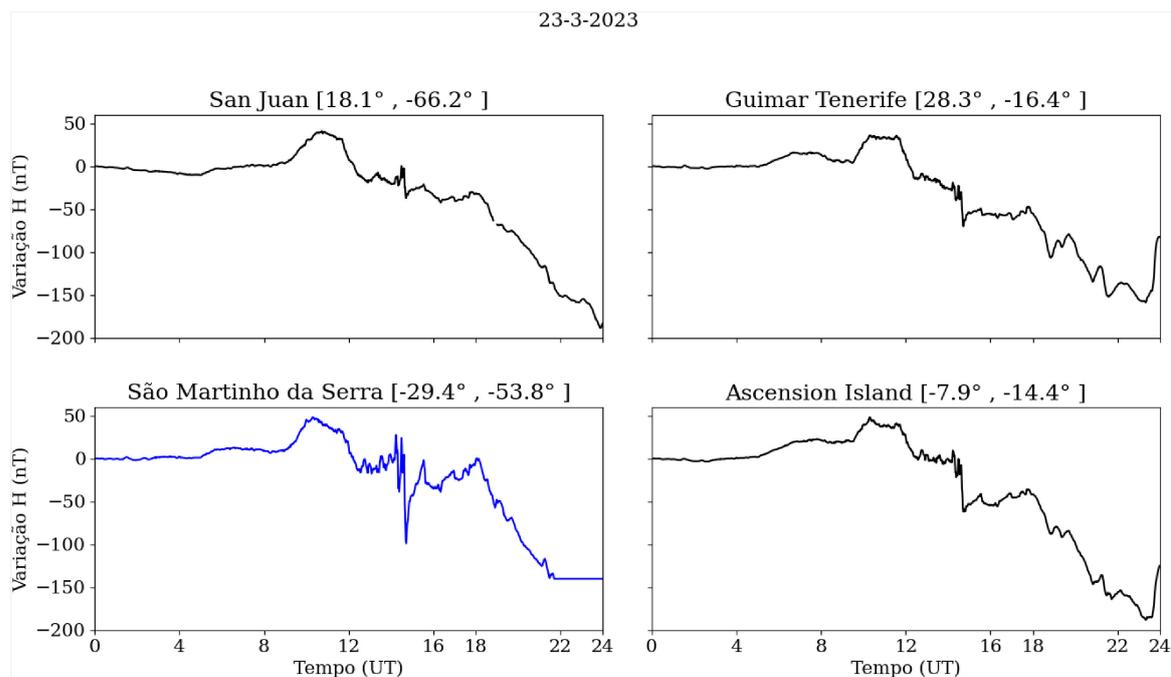


Figura 9: Resposta dos magnetômetros para a tempestade geomagnética ocorrida em 23 de março de 2023 para dois pares de Estações localizadas na mesma linha L-Shell. Os pares conjugados são San Juan ($18,1^\circ S, 66,22^\circ O$) e São Martinho da Serra ($29,4^\circ S, 53,8^\circ O$), Guimar (GUI) ($57,0^\circ N, 25,4^\circ L$) e Ascension Island (ASC) ($7,9^\circ S, 14,4^\circ O$). A estação SMS está destacada em azul por estar localizada no centro da SAMA.

estudado a influência da SAMA em sinais medidos em solo. Por exemplo, um estudo conduzido por Trivedi et al. (2005) sugeriu que o efeito da SAMA sobre SMS pode ser atribuído indiretamente à precipitação regular de elétrons de baixa energia do cinturão de radiação interno, o que, por sua vez, pode aumentar a condutividade da ionosfera da região E. Camacho et al. (2022) e Piassi (2018) compararam sinais de campo geomagnético com frequências maiores, denominadas pulsações magnéticas Pc(5), e também encontraram amplificação no sinal [30–32].

Há também pesquisas sobre anomalias na ionosfera local. Resende et al. (2022) publicaram, em seu trabalho, a demonstração da existência de camadas esporádicas típicas de regiões aurorais na região brasileira. Mais recentemente, Da Silva et al. (2023) propuseram que a variabilidade no fluxo de elétrons nos cinturões de radiação da Terra pode causar a precipitação de elétrons de baixa energia na atmosfera sobre as regiões aurorais e da SAMA, provocando ionização extra na alta atmosfera, explicando assim a formação de camadas esporádicas na região E da ionosfera brasileira [33, 34].

Apesar dos estudos apresentados já terem investigado a influência da Anomalia Magnética do Atlântico Sul (SAMA) em dados geomagnéticos medidos em solo, ainda existe uma lacuna significativa na compreensão completa desse fenômeno. A maior parte da pesquisa existente se limita a estudos de caso específicos, que muitas vezes não capturam a variabilidade e os efeitos amplos da SAMA em diferentes condições geomagnéticas e ambientais. Um desafio importante nesse contexto é a dificuldade de se realizar medições diretas da precipitação de partículas na região e da condutividade ionosférica local, que desempenha um papel crucial na modulação dos sinais geomagnéticos. Além disso, a condutividade ionosférica pode variar consideravelmente em função de fatores como a atividade solar e as condições atmosféricas, tornando suas medições complexas e imprecisas. Portanto, há uma necessidade urgente de mais estudos sistemáticos e abrangentes para elucidar como a SAMA afeta os dados geomagnéticos em solo, permitindo uma melhor compreensão e modelagem dos fenômenos geomagnéticos associados.

7. Conclusão

Neste trabalho, foi apresentada uma análise sobre a interação entre o plasma do vento solar e a magnetosfera terrestre. Com enfoque em tempestades geomagnéticas, busca-se entender a resposta do Campo Magnético Terrestre (CMT) a esse fenômeno, mais especificamente nos SIs, que constituem a primeira resposta à variação de pressão do vento solar. Revisamos a teoria da reconexão magnética, entrelaçando conceitos teóricos com dados experimentais e simulações.

Destacamos os sinais de SI observados em dados de magnetômetros instalados em baixas e altas latitudes.

Para explicar as variações morfológicas desses sinais, foi revisada a teoria relacionada à geração e propagação de ondas na magnetosfera e como elas geram os SIs. Ao analisar a morfologia dos impulsos medidos em solo, foram observadas contribuições significativas das correntes ionosféricas, revelando influências das correntes de Hall e de Pedersen nas regiões polares e equatoriais, geradas no dínamo polar [27, 29]. Apesar das diferenças morfológicas, a observação simultânea de SI em todas as regiões do globo sugere um mecanismo de transporte imediato de perturbações geomagnéticas das regiões aurorais para baixas latitudes pela ionosfera, um fenômeno que pode ser explicado pelos modelos de Nishida (1962) e Araki (1977) [22, 25].

Com base no estudo de caso apresentado, demonstramos que, apesar de a teoria sobre a geração e propagação dos SIs estar bem estabelecida, ainda existem discrepâncias em alguns resultados que permanecem não explicadas. A análise realizada, embora preliminar, destaca a amplificação do sinal na estação de SMS e sublinha a necessidade de uma investigação mais detalhada dos fenômenos aerodinâmicos na região brasileira, especialmente em relação à SAMA. Essas observações ressaltam a importância de estudos adicionais nessa área, particularmente sobre os fenômenos aeroespaciais associados à SAMA, que parecem estar influenciando esses sinais.

Por fim, destacamos o programa EMBRACE do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), que oferece dados contínuos e abertos à comunidade científica sobre o Campo Magnético Terrestre (CMT) na região brasileira. A rede tem contribuído significativamente para o estudo do clima espacial no Brasil, fortalecendo a pesquisa e demonstrando a importância dos investimentos no setor de ciência aeroespacial no país.

Agradecimentos

Os autores expressam agradecimentos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro. Também agradecem ao Ministério Brasileiro de Ciência, Tecnologia e Inovação, à Agência Espacial Brasileira e ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais pela disponibilização dos dados por meio do programa EMBRACE. Além disso, os autores agradecem à NASA pelos serviços fornecidos pelo Centro de Dados de Física Espacial da NASA/Goddard (SPDF) e ao Centro de Modelagem Coordenada da Comunidade (CCMC), que forneceu o modelo BATSRUS utilizado em nossas simulações.

Referências

- [1] W.H. Campbell, em: *Introduction to Geomagnetic Fields: Second Edition* (Cambridge University Press, Cambridge, 2003), v. 1.

- [2] M.G. Kivelson e C.T. Russell, em: *Introduction to space physics* (Cambridge University Press, Cambridge, 1995), v. 1.
- [3] P. Charnpneau, *Living Reviews in Solar Physics* **2**, 1 (2005).
- [4] M. Piersanti e U. Villante, *Journal of Geophysical Research: Space Physics* **121**, 6674 (2016).
- [5] T. Kikuchi, L. Hermann, T. Kitamura, O. Saka e K. Schlegel, *Journal of Geophysical Research: Space Physics* **101**, 17161 (1996).
- [6] J. Rasson, in: *Observatories, INTERMAGNET – Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism* (Institut Royal Météorologique, Uccle, 2007).
- [7] C.M. Denardini, S. Dasso e J.A. Gonzalez-Esparza, *Advances in Space Research* **8**, 1960 (2016).
- [8] C.M. Denardini, S.S. Chen, L.C.A. Resende, J. Moro, A.V. Bilibio, P.R. Fagundes, M.A. Gende, M.A. Cabrera, M.J.A. Bolzan, A.L. Padilha et al., *Radio Science* **53**, 288 (2018).
- [9] E.N. Parker, *The Physics of Fluids* **1**, 171 (1958).
- [10] E.N. Parker, *Space Science Reviews* **4**, 666 (1965).
- [11] M. Walt, em: *Introduction to geomagnetically trapped radiation* (Cambridge University Press, Cambridge, 2005).
- [12] T.I. Gombosi, D.L. Dezeuw, C.P.T. Groth, K.G. Powell, R.C. Clauer e P. Song, *From Sun to Earth: Multiscale MHD Simulations of Space Weather* (American Geophysical Union, Washington, 2001).
- [13] S. Chapman e V.C.A. Ferraro, *Nature* **126**, 129 (1930).
- [14] J.A. Bittencourt, em: *Fundamentals of plasma physics* (Springer Science & Business Media, Berlin, 2013).
- [15] W.D. Gonzalez e F.S. Mozer, *Journal of Geophysical Research* **79**, 4186 (1974).
- [16] W.D. Gonzalez, S.L.G. Dutra e O.J. Pinto, *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics* **49**, 377 (1987).
- [17] J.W. Dungey, *Physical Review Letters* **6**, 47 (1961).
- [18] D.J. Southwood e W.J. Hughes, *Space Science Reviews* **35**, 301 (1983).
- [19] L.C. Lee e Z.F. Fu, *Geophysical Research Letters* **12**, 105 (1985).
- [20] M. Scholer, *Geophysical Research Letters* **15**, 291 (1988).
- [21] K.J. Genestreti, L.M. Kistler e C. Mouikis, *The role and dynamics of oxygen of ionospheric origin in magnetopause reconnection*. Tese de Doutorado, University of New Hampshire, Durham (2012).
- [22] A. Nishida e J.A. Jacobs, *Journal of Geophysical Research* **67**, 525 (1962).
- [23] C.T. Russell e M.M. Hoppe, *Space Science Reviews* **34**, 155 (1983).
- [24] C.T. Russell e R.C. Elphic, *Space Science Reviews* **22**, 681 (1978).
- [25] T. Araki, *Planetary and Space Science* **25**, 373 (1977).
- [26] T. Araki, *Geophysical Monograph-American Geophysical Union* **81**, 183 (1994).
- [27] T. Kikuchi, T. Araki, H. Maeda e K. Maekawa, *Nature* **273**, 650 (1978).
- [28] T. Kikuchi, S. Tsunomura, K. Hashimoto e K. Nozaki, *Journal of Geophysical Research: Space Physics* **106**, 15555 (2001).
- [29] T. Tamao, *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity* **16**, 89 (1964).
- [30] N.B. Trivedi, B.M. Pathan, N.J. Schuch, M. Barreto e L.G. Dutra, *Advances in Space Research* **36**, 2021 (2005).
- [31] E. Camacho, L. Benyosef, O. Mendes e M. Domingues, *Brazilian Journal of Physics* **53**, 16 (2022).
- [32] A.R. Piassi, *Análise de pulsações magnéticas Pc3 e Pc4 na região da Anomalia Magnética do Atlântico Sul*. Dissertação de Mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São Paulo (2018).
- [33] L.C.A. Resende, Y. Zhu, C.M. Denardini, S.S. Chen, R.A.J. Chagas, L.A. da Silva, C.S. Carmo, J. Moro, D. Barros, P.A.B. Nogueira et al., *Annales Geophysicae* **40**, 191 (2022).
- [34] L.A. Silva, J. Shi, L.E. Vieira, O.V. Agapitov, L.C.A. Resende, L.R. Alves, D. Sibeck, V. Deggeroni, J.P. Marchezi, S. Chen et al., *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, **10**, 1 (2023).