



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

aa/bb/cc/dd-TDI

ANÁLISE DE FLUTUAÇÕES ALFVÊNICAS EM PARÂMETROS INTERPLANETÁRIOS: IDENTIFICAÇÃO DE PADRÕES

Guilherme Ferreira Teruel

Relatório Técnico de Iniciação Científica do PIBIC/INPE, supervisionado por Dr. Odim Mendes Jr (INPE). e Dr. Luciano Aparecido Magrini (IFSP), redigida em 14 de março de 2021.

URL do documento original:
<<http://urlib.net/xx/yy>>

INPE
São José dos Campos
2021

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3945-6923/6921

Fax: (012) 3945-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):

Presidente:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Membros:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Dr. Amauri Silva Montes - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espaciais (ETE)

Dr. André de Castro Milone - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Dr. Joaquim José Barroso de Castro - Centro de Tecnologias Espaciais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

aa/bb/cc/dd-TDI

ANÁLISE DE FLUTUAÇÕES ALFVÊNICAS EM PARÂMETROS INTERPLANETÁRIOS: IDENTIFICAÇÃO DE PADRÕES

Guilherme Ferreira Teruel

Relatório Técnico de Iniciação Científica do PIBIC/INPE, supervisionado por Dr. Odim Mendes Jr (INPE). e Dr. Luciano Aparecido Magrini (IFSP), redigida em 14 de março de 2021.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/xx/yy>>

INPE
São José dos Campos
2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Teruel, Guilherme Ferreira.

Cutter Análise de flutuações alfvênicas em parâmetros interplanetários: identificação de padrões / Guilherme Ferreira Teruel. – São José dos Campos : INPE, 2021.

ix + 17 p. ; (aa/bb/cc/dd-TDI)

Relatório (PIBIC) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2021.

Orientadores : Odim Mendes Jr. e Luciano Aparecido Magrini.

1. Geofísica Espacial. 2. Heliosfera. 3. Magnetosfera. 4. Eletrodinâmica Espacial. 5. Análise Wavelet I. Título.

CDU 000.000



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

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

Informar aqui sobre marca registrada (a modificação desta linha deve ser feita no arquivo publicacao.tex).

Texto em desenvolvimento. Atualmente não submetido à publicação. Material relativo ao:
PIBIC

RESUMO

Este trabalho lida com dados do meio interplanetário que apresentam flutuações do tipo alfvênicas. Essas flutuações tem um papel importante no processo de reconexão magnética decorrente da incidência do plasma do vento solar sobre a magnetosfera terrestre, situação que propicia as transferências de momento e energia para o interior do sistema magnetosfera-ionosfera, gerando perturbações geomagnéticas mensuráveis na superfície da Terra. A metodologia de análise de sinais baseia-se na aplicação de técnica de transformadas wavelet, em que se faz a caracterização, da participação de energia, das componentes de um sinal físico em escala-tempo. O propósito seria possibilitar a comparação de períodos escolhidos para melhor entendimento do processo físico desse tipo de acoplamento relacionado a flutuações alfvênicas. O resultado alcançado mostra a primeira aplicação do método a dados básicos.

Palavras-chave: Geofísica Espacial. Heliosfera. Magnetosfera. Eletrodinâmica Espacial. Análise Wavelet.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Interação do plasma do vento solar com a atmosfera magnetizada da Terra. Crédito: NASA	3
2.2 Onda do tipo alfvênica: flutuação transversal à direção de propagação. Crédito: UnB, Plasma	5
2.3 Sistema de correntes elétricas na magnetosfera e ionosfera. Crédito: A. D. Gvishiani e R. Lukianova	5
3.1 Dados interplanetários do plasma solar e campo magnético e índices de perturbação geomagnética na superfície	7
4.1 Escalograma da densidade N_H e velocidade do plasma do ventos solar V_{sw} e a componente magnética interplanetária B_Z de orientação Sul-Norte. 10	
4.2 Escalograma dos índices geomagnéticos equatorial Sym-H e auroral AE. .	11

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
2 EMBASAMENTO FENOMENOLÓGICO	3
3 EVENTOS E DADOS	7
4 METODOLOGIA E RESULTADOS	9
5 CONCLUSÕES PRELIMINARES	13
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15

1 INTRODUÇÃO

O plasma do vento solar, que transporta um campo magnético em si, desloca-se pelo meio interplanetário podendo alcançar e afetar astros e artefatos humanos espaciais. Superposto a esse vento, várias manifestações transientes do plasma e campo magnético interplanetário podem produzir acoplamentos eletrodinâmicos entre esse fluido magneto-hidrodinâmico proveniente do Sol e a atmosfera ionizada e magnetizada de um planeta, como é a situação da Terra. Decorrente de tais interações, todo um complicado cenário, envolvendo geração de campos elétricos e magnéticos, distribuição de plasmas, manifestação de ondas e geração de correntes elétricas, é responsável por distúrbios magnéticos no espaço próximo e na superfície da Terra (MENDES et al., 2005).

Pesquisas sobre as características desse ambiente espacial e sua interação eletrodinâmica com o planeta (KIVELSON; RUSSELL, 1996), mostram-se de extrema importância investigativa e prática, pois, cada vez mais, tais fenômenos espaciais podem provocar interferências e mesmo ser deletérios sobre instalações e serviços de tecnologias eletroeletronicamente sensíveis e mesmo à vida em voos suborbitais.

Este projeto pretende contribuir nessa área desenvolvendo uma análise de fenômeno específico, porém de importância no estudo do tempo espacial, que é o de caracterização das ocorrências de flutuações alfvênicas no meio interplanetário (YADAV, 2020). Essas flutuações tanto participam da aceleração de partículas de altas energias quanto da estruturação de acoplamento eletrodinâmico entre o plasma solar e a atmosfera terrestre, com as suas consequências sobre o espaço próximo e superfície da Terra.

Os dados utilizados compõem-se das variáveis medidas do plasma solar e das componentes do campo magnético interplanetário, obtidas por satélite orbitando o ponto lagrangeano L1, que caracteriza-se por uma posição estacionada gravitacionalmente entre o Sol e a Terra. Complementarmente, os índices geomagnéticos principais são utilizados para quantificação das perturbações magnéticas na superfície. Alguns intervalos temporais, constituindo casos de estudos, que caracterizem a ocorrência de ondas de Alfvén no meio interplanetário serão selecionados. A metodologia de análise, já existente e desenvolvida pelo grupo de pesquisa, com a adequada implementação possibilitará a investigação das características não estacionárias e da dinâmica não-linear dos casos.

Os resultados pretendidos são a verificação e caracterização de padrões que possam

ser identificados nos sinais e uma interpretação física seja ela unificadora ou, em contrário, revele-se multifacetada quanto aos processos envolvidos.

O trabalho compõe-se de vários conteúdos e etapas, que vão a seguir descritos. Inicialmente, no Capítulo 2, realiza-se um embasamento das equações de Maxwell, do conceito de plasmas e das ocorrências de flutuações do tipo alfvências. No Capítulo 3, far-se-á o exame de dos e a seleção de casos de estudos e aplicações de análises. No Capítulo 4, procede-se a aprendizagem de métodos de análises de sinais, em que se dá atenção para as técnicas baseadas em Transformadas Wavelet. Em etapa ainda a ser desenvolvida, em capítulo próprio, a partir de resultados obtidos, estabelecem-se discussões e interpretações de resultados. Por fim, no Capítulo 5, sumarizam-se o desenvolvimento feito e as conclusões alcançadas.

2 EMBASAMENTO FENOMENOLÓGICO

As Ciências Espaciais mostram-se como uma área de significativa importância para a sociedade do Século XXI (KIVELSON; RUSSELL, 1996; MENDES et al., 2005).

Isso se justifica em função da dependência crescente da sociedade de soluções tecnologicamente sensíveis à interação do ambiente espacial com a atmosfera da Terra (MENDES et al., 2005).

O Sol, pelos processos de fusão e liberação de energia em seu interior, afeta o meio interplanetário por meio da radiação eletromagnética, a radiação corpuscular de altas energias e a emissão de material de gás ionizado e magnetizado (KIVELSON; RUSSELL, 1996).

As partículas que compõem a atmosfera terrestre são energizadas e geram nas altas regiões, acima de 40-70 km, uma ionização de gases. Circunstâncias particulares acontecem a esse meio constituindo uma plasma (BITTENCOURT, 2004), que é quando o gás ionizado apresenta os comportamentos de neutralidade macroscópica, comportamento coletivo buscando essa neutralidade e sujeito a ocorrência de perturbações elétricas em um restrito volume do espaço, regido por uma lei de desbalanço elétrico designado como distância de Debye.

Em acréscimo, essa atmosfera terrestre mostra-se embriada por um campo magnético de origem interior e com variação muito lenta, da ordem de milhares de anos (KIVELSON; RUSSELL, 1996). Uma atmosfera magnetizada e formada por plasmas, ao mesmo tempo que revela-se como um obstáculo ao livre deslocamento do plasma do vento solar, sujeita-se a uma interação de acoplamento eletrodinâmico com o plasma solar (Figura 2), que também está magnetizado.

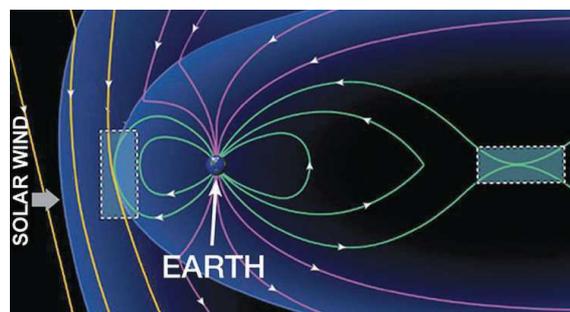


Figura 2.1 - Interação do plasma do vento solar com a atmosfera magnetizada da Terra. Crédito: NASA

Para o estudo da dinâmica, ou mais adequadamente da eletrodinâmica, do ambiente que envolve a Terra, utilizam-se um conjunto completo de equações (REITZ et al., 1982). Fundamentalmente há as equações de Maxwell, em que formulam-se as Equações da Lei Àmpere:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}, \quad (2.1)$$

da Lei de Faraday da indução eletromagnética:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (2.2)$$

da Lei de Gauss para a carga elétrica:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho, \quad (2.3)$$

e da Lei de conservação do fluxo magnético:

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0. \quad (2.4)$$

A essas acrescentam-se a Lei da força de Lorentz:

$$\frac{\delta(m\mathbf{V})}{\delta t} = \mathbf{F} \quad (2.5)$$

e as relações constitutivas da carga elétrica:

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} \quad (2.6)$$

e da indução magnética:

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} + \mathbf{M}. \quad (2.7)$$

Referente às variáveis e termos nessas equações, \mathbf{H} é o vetor campo magnético, \mathbf{B} o vetor indução magnética, \mathbf{M} o termo de magnetização do meio, \mathbf{E} o vetor campo elétrico, \mathbf{D} o vetor de deslocamento elétrico, \mathbf{P} o termo de polarização elétrica do meio, ϵ_0 a constante de permissividade elétrica no vácuo, μ_0 permeabilidade elétrica no vácuo, ρ a densidade volumétrica de carga elétrica, \mathbf{J} o vetor de densidade superficial de corrente elétrica e m a massa de um corpo ou partícula.

Suportado por esse formalismo, considerando também o ambiente de interação eletrodinâmica, um dos fenômenos que se pode dar atenção é a manifestação de flutuações do tipo alfvênicas no espaço (KIVELSON; RUSSELL, 1996; MENDES et al., 2005). Essas se caracterizam como uma perturbação transversal do campo magnético inter-

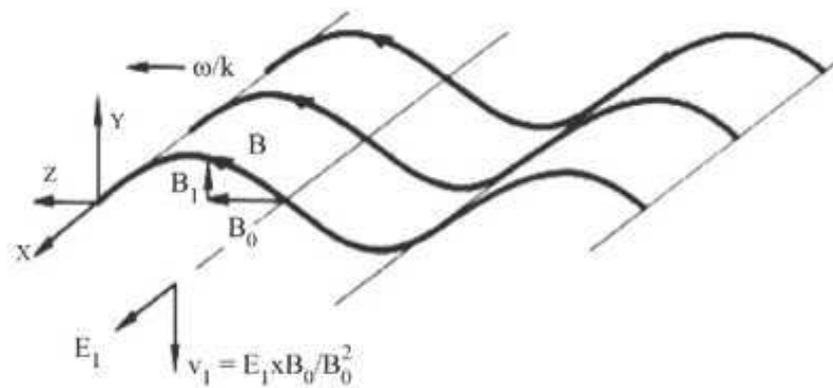


Figura 2.2 - Onda do tipo alfvênica: flutuação transversal à direção de propagação. Crédito: UnB, Plasma

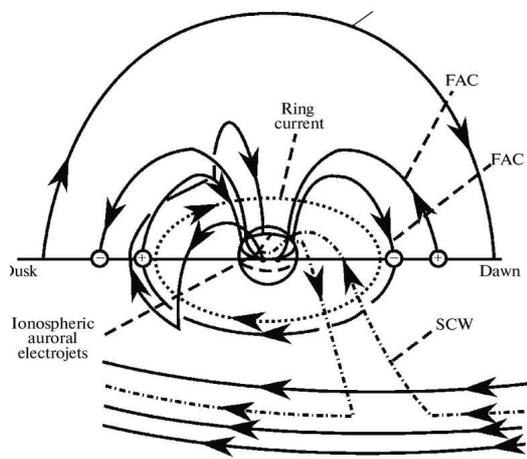


Figura 2.3 - Sistema de correntes elétricas na magnetosfera e ionosfera. Crédito: A. D. Gvishiani e R. Lukianova

planetário (CMI) em respeito à sua direção de propagação. Uma visualização prática seria imaginar uma corda de violão sob um movimento de oscilação (Figura 2).

O aspecto de interesse desse tipo de fenômeno interplanetário é que a orientação de componente do CMI em oposição à orientação do campo geomagnético é propícia a ativar e desativar um processo de reconexão magnética na parte frontal da magnetosfera, *i.e.* na posição diurna. Essa reconexão traduz-se como um processo de fusão das linhas do CMI e do campo geomagnético, situação que possibilita a entrada de energia e transferência do plasma solar para a região dominada pelo campo geomagnético, a magnetosfera. Esse regime de interação produz modificações nos plasmas do entorno da Terra e a estruturação de correntes elétricas (Figura 2), causando perturbações magnéticas detectáveis inclusive na superfície da Terra.

3 EVENTOS E DADOS

De forma a estruturar uma metodologia para os estudos de interesse sobre interação de flutuações do tipo alfvênicas com o ambiente terrestre, inicialmente utiliza-se de uma forma quantitativa para o modelo conceitual anteriormente apresentado, evidenciando o comportamento relacionado a fenômeno, e a seguir os tipos de dados que serão utilizados para o desenvolvimento do estudo.

Para explorar e possibilitar o entendimento da flutuação do campo magnético interplanetário consideram-se as utilizações das seguintes medidas conjuntas: as componentes do CMI (B_z , B_y , B_x , $|B|$) descritas no sistema referencial GSM (Sol, Terra e plano do dipolo geomagnético), a densidade (Nh) e a velocidade (V_{sw}) do plasma do vento solar¹. Para o acompanhamento e quantificação das perturbações magnéticas na superfície da Terra, escolhem-se os índices geomagnéticos equatorial (medida de efeitos em médias para baixas latitudes) Dst e do eletrojato auroral (medida em altas latitudes) AE².

A Figura 3 ilustra esses dados para um evento arbitrário escolhido (19 a 24 de abril de 2003); no entanto, tal escolha considera um período que contém ocorrência de flutuações do tipo alfvênicas.

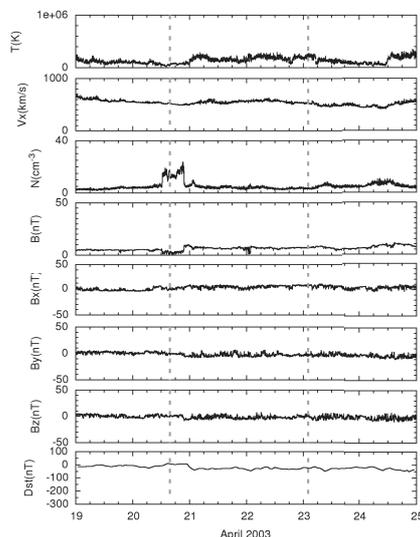


Figura 3.1 - Dados interplanetários do plasma solar e campo magnético e índices de perturbação geomagnética na superfície

¹Acesso aos dados do OMNI Service Web, da NASA: https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/omni_min.html

²Acesso aos dados geomagnéticos do World Data Center (WDC), Tokyo: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html>

4 METODOLOGIA E RESULTADOS

Os tratamentos dos dados são feitos por aplicações de metodologias baseadas em técnicas de transformadas wavelet (CASTILHO et al., 2012). Esta abordagem de tratamento possibilita uma análise de sinais de forma mais plena, uma vez que pode lidar com sinais tanto não estacionários quanto da complicada física não linear.

Uma função para que seja denominada wavelet deve satisfazer duas condições fundamentais. A primeira é a condição de admissibilidade, isto é, que a integral dessa função deva ser zero, o que garante que constitua-se de uma forma oscilatória com sua integral resultando em valor zero. A segunda é que a integral de sua energia seja unitária, que garante um decaimento rápido de amplitude, isto é, que a função possua um suporte compacto.

A aplicação de uma ferramenta de análise por técnica wavelet, estruturada pela equipe em que os pesquisadores supervisores atuam, possibilita ter a apresentação das características dos sinais em uma representação de energia do sinal por escala-tempo. Nesta etapa de trabalho, este esforço constitui-se em um procedimento exploratório, para primeiro contato com recursos de investigação.

Na Figura 4, os escalogramas apresentam os resultados para as medidas físicas, de cima para baixo, da densidade do plasma solar (N_H), da velocidade do seu fluxo incidente sobre a região da Terra (V_{sw}) e da componente do campo magnético interplanetário (B_Z), escolhidas por suas características geofetivas no processo de acoplamento eletrodinâmico.

Completando as condições para investigação exploratória, na Figura 4, os escalogramas apresentam os resultados para as análises dos índices geomagnéticos, de cima para baixo, equatorial Sym-H e auroral AE.

A análise de sinais por meio dessa abordagem permite acompanhar as energias do sinal (intensidade de sua participação) nas escalas (relacionadas a frequências centrais) ao longo do tempo. Com isso, períodos dos fenômenos de interesse poderiam ser caracterizados quanto as propriedades de comportamento e possibilitar comparação entre eles. O trabalho poderia enriquecer-se paulatinamente de novas análises a partir da escolha e introdução de novas técnicas, que visariam propósitos específicos.

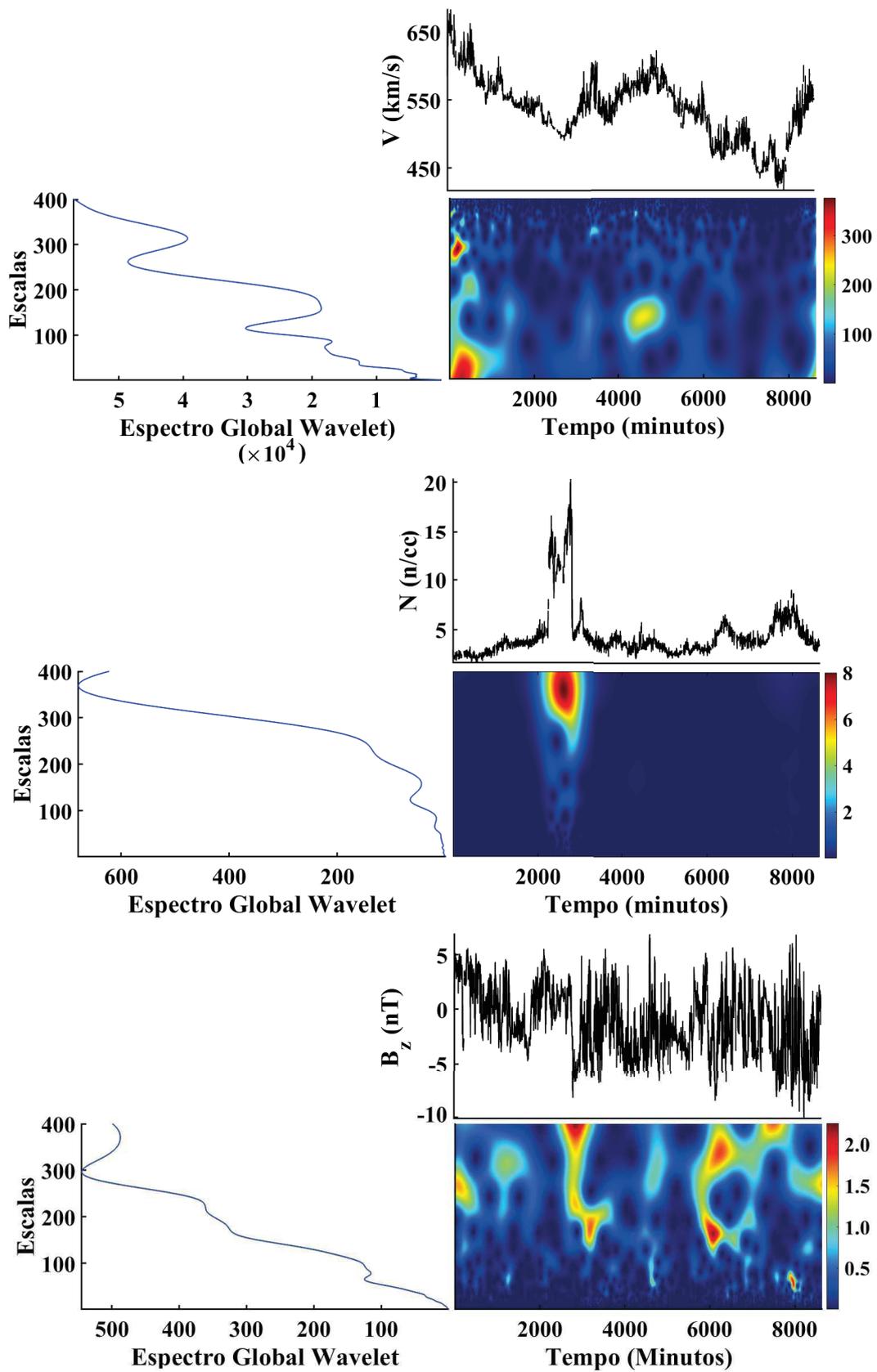


Figura 4.1 - Escalograma da densidade N_H e velocidade do plasma do ventos solar V_{sw} e a componente magnética interplanetária B_Z de orientação Sul-Norte.

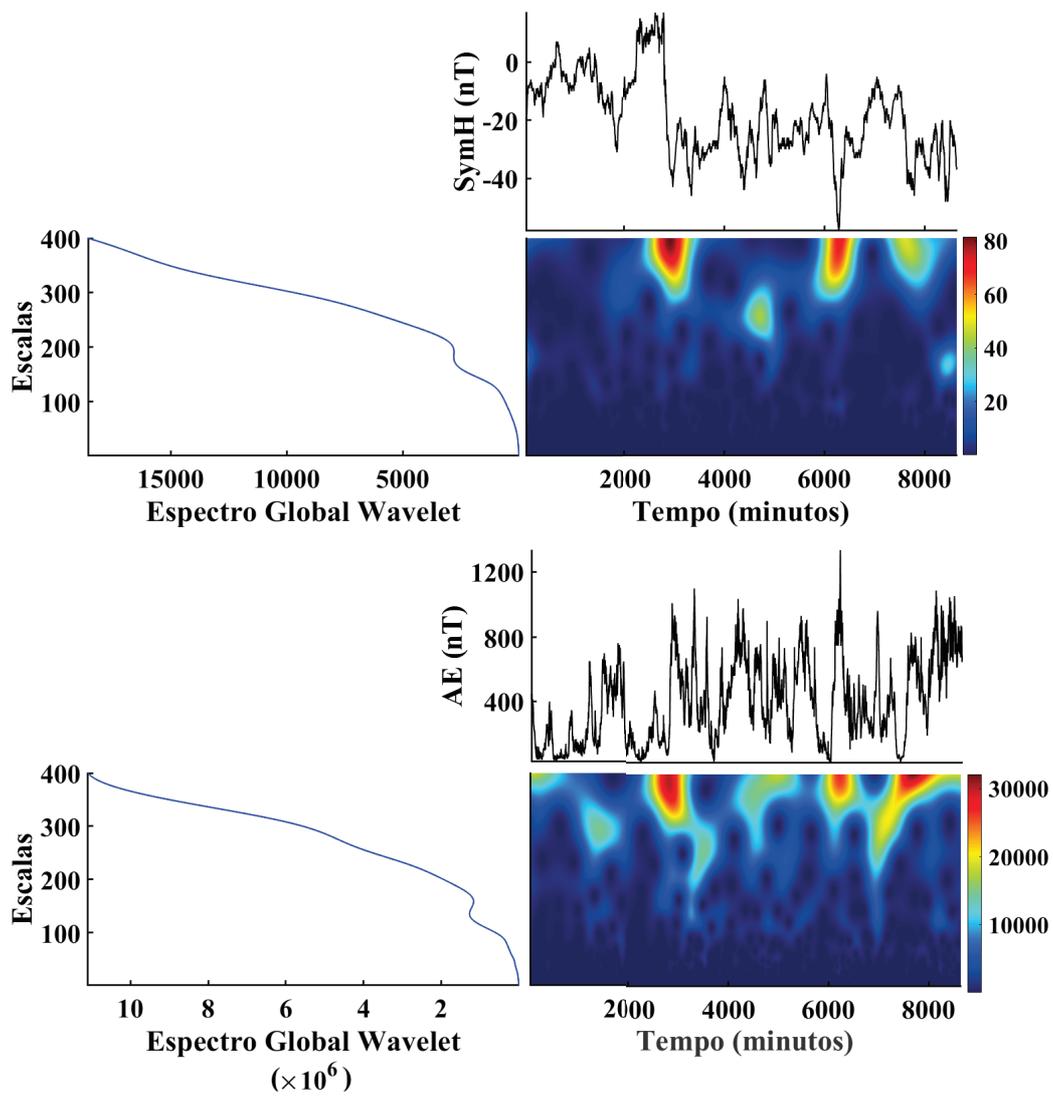


Figura 4.2 - Escalograma dos índices geomagnéticos equatorial Sym-H e auroral AE.

5 CONCLUSÕES PRELIMINARES

No período do trabalho planejado, pôde-se obter entendimento inicial de área de atuação em Ciências Espaciais considerando um fenômeno eletrodinâmico de interesse e exemplo de abordagem metodológica.

De forma prática, teve-se um contato com a eletrodinâmica do ambiente espacial. Houve o manuseio de alguns tipos de dados que são úteis para caracterizar este ambiente. Da interpretação dos primeiros resultados, pode-se evidenciar uma aparente relação das componentes tempo-escala para as variáveis interplanetárias do plasma solar e do campo magnético. A etapa alcançada foi de obter alguns primeiros resultados da caracterização do sinal, por análise evolutiva da energia por banda de frequência.

As perspectivas, quanto a próximas etapas, seriam melhorar o entendimento físico, aprimorar o manuseio dos dados e estruturar metodologia de tratamento de sinais, aumentar casos de estudos e proceder análises, para possibilitar interpretações de resultados e, pela comparação dos comportamentos caracterizados, obter conclusões.

Agradecimentos:

- ao MCTI, pela oportunidade da bolsa
- ao INPE, pelo ambiente científico
- ao SICINPE, pelo desenvolvimento acadêmico e de pesquisa científica
- aos orientadores, pela chance da interação educacional-científica

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BITTENCOURT, J. A. **Fundamentals of Plasma Physics**. [S.l.]: Springer, 2004. 3
- CASTILHO, J. E.; DOMINGUES, M. O.; MENDES, O.; AYLTON, P. **Introdução ao mundo das wavelets**. [S.l.: s.n.], 2012. ISBN 978-85-8215-013-9. 9
- KIVELSON, M. G.; RUSSELL, C. T. **Introduction to Space Physics**. [S.l.]: Cambridge, 1996. 1, 3, 4
- MENDES, O.; Mendes da Costa, A.; DOMINGUES, M. O. Introduction to planetary electrodynamics: A view of electric fields, currents and related magnetic fields. **Advances in Space Research**, n. 35, p. 812–828, 2005. 1, 3, 4
- REITZ, J. R.; MILFORD, F. J.; CHRISTY, R. W. **Fundamentos da teoria eletromagnética**. [S.l.]: Elsevier-Campus, 1982. 4
- YADAV, V. K. Alfvén wave detection at first lagrangian point with magnetic field measurements. **IETE Technical Review**, n. 37, 2020. 1

PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE

Teses e Dissertações (TDI)

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

Manuais Técnicos (MAN)

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

Notas Técnico-Científicas (NTC)

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

Relatórios de Pesquisa (RPQ)

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

Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)

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

Publicações Didáticas (PUD)

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

Publicações Seriadas

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

Programas de Computador (PDC)

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

Pré-publicações (PRE)

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