



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

**ESTUDO E MONITORAMENTO DE EVENTOS NO AMBIENTE  
ESPACIAL COM POTENCIAL PARA AFETAR SATÉLITES  
PRÓXIMOS A TERRA**

Luthiana Barchet

Relatório Final de Iniciação Científica do  
programa PIBIC, orientado pela Dra. Livia  
Ribeiro Alves e Dra. Daiene De Mello  
Schaefer.

INPE  
São José dos Campos  
2024



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

**ESTUDO E MONITORAMENTO DE EVENTOS NO AMBIENTE  
ESPACIAL COM POTENCIAL PARA AFETAR SATÉLITES  
PRÓXIMOS A TERRA**

Luthiana Barchet

Relatório Final de Iniciação Científica do  
programa PIBIC, orientado pela Dra. Livia  
Ribeiro Alves e Dra. Daiene De Mello  
Schaefer.

## RESUMO

Este projeto aborda a interação do vento solar com a magnetosfera terrestre, utilizando uma tempestade magnética como objeto de estudo. Os objetivos do projeto são investigar essa interação através de índices geomagnéticos, revisão bibliográfica, coleta e análise de dados utilizando a ferramenta Python. A metodologia adotada envolve a análise de uma tempestade magnética específica, ocorrida entre 07 e 08 de julho de 2022, classificada na escala G1 devido a um índice Kp de 5. Durante este período, dados das componentes horizontal (H) do campo magnético terrestre e norte-sul (Bz) do campo magnético interplanetário foram coletados da estação terrestre de Medianeira-PR e do satélite ACE, respectivamente. A partir desses dados, foi possível realizar uma série de análises para identificar a influência do vento solar na magnetosfera terrestre. A influência do vento solar é identificada através da análise de pulsações magnéticas no campo magnético terrestre durante períodos geomagneticamente perturbados. Inicialmente, foram analisados os espectros de potência da componente H, utilizando a Transformada de Fourier, para identificar as principais faixas de frequência das pulsações magnéticas que são 3-8 mHz (Pc5) e 8-16 mHz (Pc4). Posteriormente, a análise wavelet foi aplicada para melhorar a resolução da potência em relação ao tempo e frequência, identificando pulsações contínuas. As faixas espectrais escolhidas para análise (3-8 mHz e 8-16 mHz) foram utilizadas como limites de um filtro passa-faixa aplicado aos dados e os resultados obtidos a partir dos periodogramas mostram a presença de pulsações magnéticas Pc4 e Pc5 com diferentes amplitudes ao longo das fases da tempestade analisada. Além disso, uma análise cruzada das séries temporais filtradas das componentes H e Bz foi realizada para verificar quais potências estão mais correlacionadas com flutuações do campo Bz do vento solar e em qual fase da tempestade elas ocorrem. Dessa forma, os periodogramas filtrados foram separados em janelas cujas maiores potências foram identificadas e em quais períodos elas ocorriam. A análise cruzada das componentes H e Bz mostrou que as correlações mais significativas ocorreram na fase inicial da tempestade, tanto para Pc4 quanto para Pc5, seguido da fase de recuperação para ambas as pulsações. Os resultados obtidos contribuem para a melhor compreensão dos mecanismos associados à geração de pulsações magnéticas medidas no solo em baixas latitudes.

Palavras-chave: Vento Solar. Campo Magnético. Pulsações. Tempestade Magnética.

## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 – Regiões da magnetosfera. ....	3
Figura 2.2 – Distribuição das fontes de campo magnético terrestre.....	5
Figura 2.3 – Projeções do vetor campo magnético.....	6
Figura 2.4 – Fases de uma tempestade magnética.....	7
Figura 4.1 – Parte do código em Python feito para subtração do campo total. ....	11
Figura 4.2 – Parte do código em Python feito para corrigir erros dos dados de Bz. ....	11
Figura 4.3 – Parte do código em Python que calcula o spectrogram e faz a plotagem. .	12
Figura 4.4 – Parte do código em Python responsável pelo filtro.....	12
Figura 4.5 – Parte do código em Python responsável a análise wavelet. ....	13
Figura 4.6 – Parte do código em Python responsável pela wavelet cruzada. ....	14
Figura 4.7 – Fluxograma fase 1 da metodologia do projeto.....	14
Figura 4.8 – Fluxograma fase 2 da metodologia do projeto.....	15
Figura 4.9 – Fluxograma fase 3 da metodologia do projeto.....	15
Figura 5.1 – Índice Kp durante os três dias de dados.....	16
Figura 5.2 – Componente H do Campo Magnético Terrestre (MED).....	17
Figura 5.3 – Componente BZ do Campo Magnético Interplanetário (ACE). ....	17
Figura 5.4 – Espectro Fourier da potência e variação da componente H CMT(MED)..	18
Figura 5.5 – Espectro de potência wavelet componente H CMT (MED). ....	18
Figura 5.6 – Resultado filtro de frequência na faixa 1. ....	19
Figura 5.7 – Resultado filtro de frequência na faixa 2. ....	19
Figura 5.8 – Identificação do período de pulsações Pc5. ....	20
Figura 5.9 – Identificação do período de pulsações Pc4. ....	20
Figura 5.10 – Espectros de potência das componentes H e Bz. ....	21
Figura 5.11 – Análise wavelet cruzada filtro de 3 a 8 mHz. ....	22
Figura 5.12 – Períodos identificados de maior correlação em cada janela filtro 3 a 8 mHz .....	22
Figura 5.13 – Análise wavelet cruzada filtro de 8 a 16 mHz. ....	23
Figura 5.14 – Períodos identificados de maior correlação em cada janela filtro 8 a 16 mHz. ....	24

## LISTA DE TABELAS

	<b><u>Pág.</u></b>
Tabela 2.1 – Pulsações contínuas e irregulares. ....	9
Tabela 4.1 – Valores para calibração magnetômetro de Medianeira-PR. ....	11
Tabela 5.1 – Períodos das maiores correlações e pulsações no filtro 3 a 8 mHz. ....	25
Tabela 5.2 – Períodos das maiores correlações e pulsações no filtro 8 a 16 mHz. ....	25

## SUMÁRIO

	<b><u>Pág.</u></b>
1 INTRODUÇÃO .....	1
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	2
2.1 Interação solar-terrestre.....	2
2.2 Campo magnético terrestre.....	4
2.3 Tempestade magnética .....	6
2.4 Pulsações magnéticas .....	8
3 OBJETIVOS.....	9
4 METODOLOGIA .....	10
4.1 Aquisição de dados e tratamento.....	10
4.2 Técnicas para análise de dados.....	12
5 RESULTADOS .....	15
5.1 Tempestade magnética e séries temporais utilizadas .....	16
5.2 Espectros de potência da componente H.....	17
5.2.1 Espectro de Fourier e identificação das principais faixas de frequência.....	17
5.2.2 Espectro wavelet e identificação de pulsações magnéticas .....	18
5.3 Análise wavelet cruzada.....	21
6 DISCUSSÃO E CONCLUSÃO.....	26
7 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	26
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	27

# 1 INTRODUÇÃO

As interações entre o vento solar e a magnetosfera terrestre desempenham um papel crucial na dinâmica do ambiente espacial, sendo diretamente associadas a fenômenos como tempestades geomagnéticas e pulsações magnéticas. Esses eventos podem gerar impactos significativos tanto na Terra quanto em satélites ou sistemas de telecomunicações (Kamide; Chian, 2007).

Um dos principais fenômenos de interesse é a ejeção de massa coronal (CME), que consiste na liberação de plasma e campos magnéticos a partir do Sol. Quando essas partículas atingem a Terra, elas podem desencadear tempestades geomagnéticas ao interagir com o campo magnético terrestre, gerando variações significativas nas suas componentes, como na componente horizontal (H) (Piassi, 2018). Essas tempestades são caracterizadas por fases bem definidas, como o aumento súbito da intensidade do campo magnético, seguido de uma fase principal de diminuição, e, por fim, a fase de recuperação, na qual o campo volta ao seu estado normal (Kamide; Chian, 2007).

As tempestades magnéticas também são acompanhadas por pulsações geomagnéticas, ou pulsações de frequência ultrabaixa (ULF), que se manifestam em faixas de frequência específicas, como as do tipo Pc4 e Pc5. Essas oscilações são detectadas em solo por meio de instrumentos como magnetômetros e podem revelar informações importantes sobre a interação entre o vento solar e a magnetosfera (Marchezi, 2016).

O estudo detalhado dessas pulsações e sua relação com as fases das tempestades magnéticas permite compreender melhor os mecanismos de acoplamento entre o vento solar e a magnetosfera. Além disso, ajuda a criar estratégias para proteger satélites e sistemas de comunicação em órbita, reduzindo os riscos causados por esses eventos espaciais.

Este trabalho, portanto, visa analisar a tempestade magnética ocorrida em julho de 2022 e investigar as pulsações magnéticas associadas, buscando identificar correlações entre as componentes H e Bz e o comportamento do vento solar, utilizando ferramentas como a Transformada de Fourier e a análise wavelet.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção, será abordado aspectos fundamentais para a compreensão deste estudo. Serão discutidos elementos essenciais que fornecerão a base teórica necessária para a análise e interpretação dos resultados apresentados ao longo deste trabalho.

### 2.1 Interação solar-terrestre

O sol é considerado a principal estrela do sistema solar, podendo ele influenciar o clima na terra e o clima espacial, termo referente as condições em constante mudança no ambiente espacial, caracterizado pelas interações com emissões solares, como erupções solares, partículas energéticas do sol e ejeções de massa coronal (Wackler, 2015).

No sol é possível encontrar regiões mais frias que suas vizinhanças e que possuem um campo magnético solar mais intenso, regiões estas conhecidas como manchas solares. A ejeção de massa coronal (CME, do inglês *Coronal Mass Ejection*) é uma nuvem gigante composta por plasma solar e campo magnético interplanetário (CMI), elas ocorrem com frequência durante alta atividade solar e são provenientes da região do sol conhecida como Coroa, a CME é liberada durante fortes erupções solares e com isso causam o aumento da velocidade do vento solar, sendo assim uma das principais fontes de tempestades magnética. Quando uma CME chega à Terra pode causar danos a sistemas elétricos, telecomunicação e o aumento de pulsações magnéticas medidas em solo. As manchas solares surgem em um ciclo de aproximadamente 11 anos, marcado por fases de mínima e máxima atividade solar, fases que coincidem com as variações geomagnéticas terrestres, evidenciando a influência do Sol na Terra (Kane, 2005).

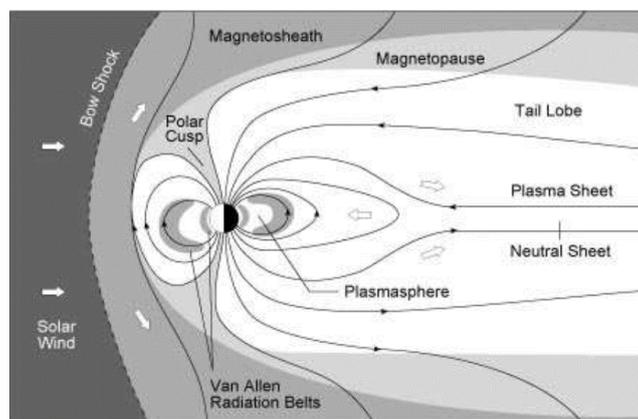
O vento solar que atinge a Terra carrega consigo partículas originadas do sol, porém, antes de atingir nosso planeta o vento solar encontra o campo magnético terrestre (CMT). Em um primeiro momento o vento possui velocidade supersônica, esperando assim que as partículas atingissem diretamente o CMT, entretanto é formada uma onda de choque antes do impacto. Esta onda acaba convertendo parte da energia das partículas em movimento térmico e reduzindo a velocidade do vento para subsônica (Piassi, 2018).

Esta interação do vento solar com o CMT forma a região chamada magnetosfera, onde o CMT controla a dinâmica das partículas. A magnetosfera possui lado diurno e noturno, a interação constante do vento solar acaba comprimindo o lado diurno enquanto no noturno é alongado formando uma cauda. É fundamental destacar que a magnetosfera é um sistema em constante mudança e suas características são influenciadas pela velocidade, campo magnético terrestre e temperatura do vento solar (Piassi, 2018).

A magnetosfera é dividida em regiões como mostra a Figura 2.1. Cada região é caracterizada da seguinte maneira:

- **Onda de Choque (Bow Shock):** região que se forma com o choque do vento solar com a magnetopausa com isso diminuindo sua velocidade;
- **Camada de Revestimento (Magnetosheath):** área onde o vento passa a ser subsônico após atravessar a onda e choque;
- **Magnetopausa (Magnetopause):** é a camada mais externa da magnetosfera, ela separa os plasmas do vento solar do magnetosférico. Nesta região se encontra a corrente de Chapman-Ferraro, ela flui no sentido amanhecer-entardecer e provoca súbita alteração no CMT e no plasma;
- **Cauda Magnética (Tail Lobe):** localizada na região noturna da magnetosfera é onde as linhas de campo são alongadas, ocorre também o acúmulo de energia do vento solar, que posteriormente é liberado na região auroral;
- **Lâmina de Plasma (Plasma sheet):** considerada uma região instável, separa a cauda magnética em lóbulo norte e sul, tendo direções opostas de campo magnético e com isso gerando correntes elétricas.

Figura 2.1 – Regiões da magnetosfera.



Fonte: Öztürk (2012).

## 2.2 Campo magnético terrestre

O campo magnético da terrestre ( $\mathbf{B}$ ), também conhecido por campo geomagnético, é dividido em dois conforme o local de origem destes campos, sendo eles campo magnético externo e campo magnético interno. O interno representa aproximadamente 95% do campo magnético da terra e o externo representa o restante (Olsen; stolle, 2012).

Como propriamente o nome diz, o campo magnético interno tem sua origem no interior da terra, sendo subdividido em campo magnético principal ( $\mathbf{B}_P$ ), campo magnético crustal ( $\mathbf{B}_C$ ) e campo magnético induzidos por correntes ( $\mathbf{B}_i$ ). O campo magnético externo ( $\mathbf{B}_e$ ) tem sua origem além da superfície terrestre, sendo gerado pelas correntes elétricas presentes na magnetosfera e na ionosfera (Olsen; stolle, 2012).

As correntes elétricas que contribuem para o campo magnético externo são: corrente de Chapman-Ferraro presente no lado diurno da magnetosfera, a corrente da cauda no lado noturno, a corrente anelar no plano equatorial e as correntes alinhadas ao campo (FAC, do inglês Field Aligned Currents), estas circulam na magnetosfera terrestre. As correntes que fluem na ionosfera são: o sistema de correntes Sq, o Eletrojato Equatorial (EEJ, do inglês Equatorial Electrojet), e o Eletrojato Auroral. (AEJ, do inglês Auroral Electrojet). As variações no campo magnético são influenciadas, em diferentes medidas, pelas correntes elétricas citadas acima.

Logo, a definição do campo magnético terrestre total consiste na soma de todas as contribuições, conforme expresso pela Equação 2.1. Dependendo da fonte do campo magnético a magnitude média medida na superfície terrestre pode variar.

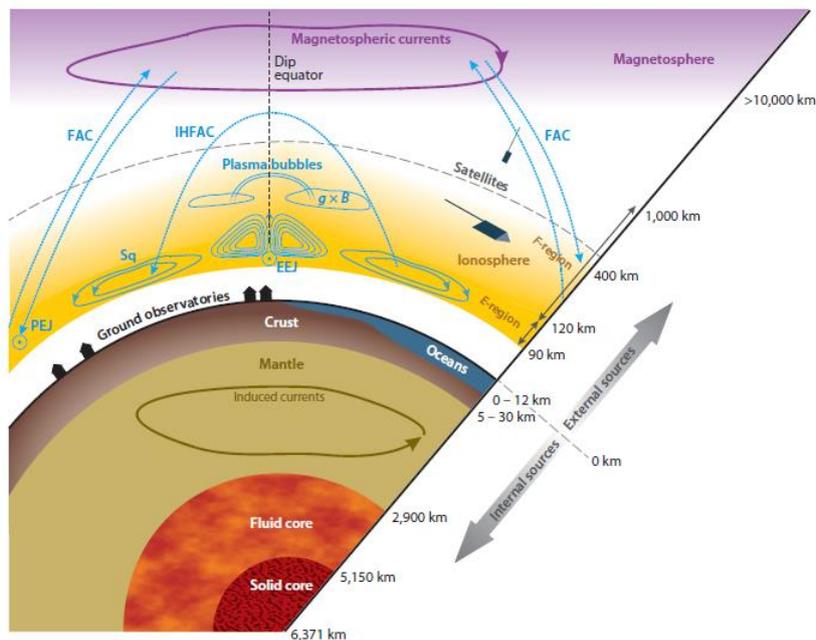
$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_P + \mathbf{B}_C + \mathbf{B}_i + \mathbf{B}_e \quad (2.1)$$

A Figura 2.2 é uma representação da distribuição das diferentes fontes de campo magnético. Na diagonal desta figura, é representada uma escala de comprimento que se estende desde o centro da Terra até cerca de  $10^4$  km acima da superfície terrestre. As linhas contínuas e tracejadas representam os sistemas de correntes elétricas que contribuem para a magnitude do campo magnético.

O campo magnético é uma grandeza física vetorial, com isso, possui magnitude, direção e sentido. Por apresentar estas características é possível projetar o campo magnético  $\mathbf{B}$  em um sistema de coordenadas cartesianas como apresentado na Figura 2.3, onde  $F$  é a magnitude do campo dada por  $F = |\mathbf{B}|$ ,  $Z$  a componente vertical,  $X$  componente norte-sul,  $Y$  representa a componente leste-oeste. Enquanto  $D$  e  $I$  são variáveis angulares, onde  $D$  é a declinação, ângulo que a componente  $H$  faz com  $X$  e  $I$  é a inclinação, ângulo que o campo magnético faz com a componente  $H$ . A direção das setas representa o sentido positivo de cada componente (Morais, 2023).

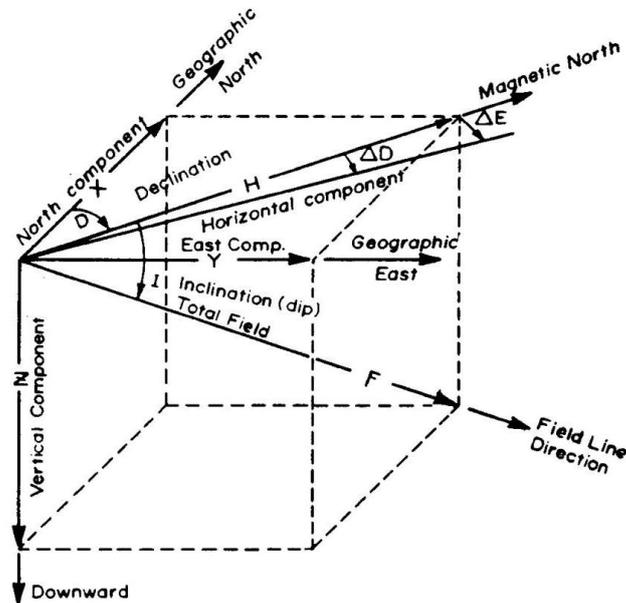
É importante ressaltar que dependendo das correntes elétricas que circulam na magnetosfera é possível que haja uma intensificação ou diminuição da magnitude do campo magnético. Isso ocorre pelo fato destas correntes sofrerem influência da atividade solar, sendo relacionadas as tempestades geomagnéticas (Morais, 2023).

Figura 2.2 – Distribuição das fontes de campo magnético terrestre.



Fonte: Olsen e Stolle (2012).

Figura 2.3 – Projeções do vetor campo magnético.



Fonte: Campbell (2003).

### 2.3 Tempestade magnética

Como mencionado anteriormente, as fases de mínima e máxima atividade solar coincidem com as variações magnéticas terrestres. Dessa forma, durante a interação entre uma CME e o campo magnético terrestre, ocorre a reconexão das linhas de campo, resultando na injeção de plasma na magnetosfera. Este fenômeno alimenta os sistemas de correntes presentes na magnetosfera, gerando assim campos magnéticos que se sobrepõem ao campo magnético terrestre. Deste processo, é possível observar em solo variações significativas nas componentes do campo magnético (Piassi, 2018). Estas perturbações são chamadas de tempestades geomagnéticas ou simplesmente tempestade magnéticas, sua principal característica é a diminuição repentina da componente H, o que pode durar normalmente de um a vários dias (Kamide; Chian, 2007).

Uma típica tempestade magnética possui três fases de ocorrência: fase inicial, fase principal e fase de recuperação. A tempestade se inicia com um aumento súbito da magnitude da componente H, decorrente do aumento da pressão dinâmica do vento solar sobre o lado diurno da magnetosfera. Nesta parte frontal haverá um aumento das correntes de Chapman-Ferraro que amplifica o campo magnético. Esta fase inicial pode perdurar por algumas horas. Passado um tempo, a corrente do anel é intensificada, com

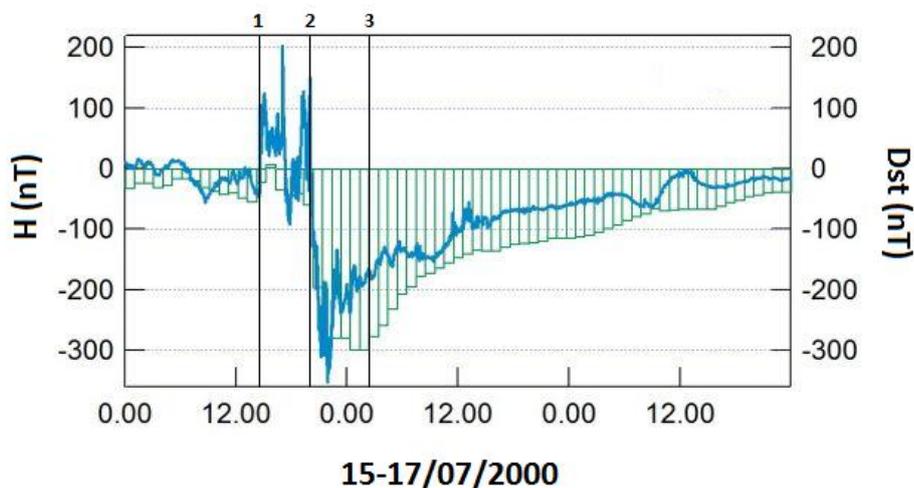
seus íons se deslocando de leste a oeste e elétrons no sentido oposto, o campo magnético gerado por esta corrente se opõe ao campo magnético da terra, resultando na diminuição repentina da componente H, caracterizando então a fase principal da tempestade (Piassi, 2018).

Conforme a quantidade de partículas carregadas pelo campo magnético interplanetário diminui ou que sua componente vertical muda de polaridade, a injeção de partículas na magnetosfera é reduzida, marcando o fim da intensificação da corrente do anel. Inicia-se então, a fase de recuperação, que pode levar dias até que a magnitude da componente H atinja seus valores normais (Piassi, 2018).

Vários índices magnéticos são usados para medir atividades magnéticas, por exemplo os índices Dst, Kp e AE (Kamide; Chian, 2007). O índice Dst será usado para uma breve explicação de identificação de tempestade magnética. O uso deste índice é possível pois a intensidade do campo magnético medido em baixas latitudes é inversamente proporcional a energia presente na corrente do anel, a qual se intensifica na ocorrência de tempestades (Piassi, 2018).

A Figura 2.4 representa as fases de uma tempestade magnética e o índice Dst levando em consideração a componente H. O índice é calculado através da média dos valores da componente horizontal no intervalo de uma hora em quatro observatórios localizados próximo ao equador. Uma tempestade magnética é aceita quando apresentar valores de Dst menores que  $-50\text{nT}$  (Kamide; Chian, 2007), isto pode ser observado na Figura a seguir.

Figura 2.4 – Fases de uma tempestade magnética.



O número 1 representa o início da fase inicial da tempestade com um aumento na componente H, 2 a fase principal com a diminuição da componente e do índice causado pela intensificação da corrente do anel e 3 marcando o início da fase de recuperação com os valores retornando lentamente ao normal.

Fonte: Observatório L'Aquila (2000).

## **2.4 Pulsações magnéticas**

O campo magnético da terra pode apresentar variação lenta, como por exemplo as variações diurnas e variações rápidas, como as provocadas por tempestades geomagnéticas, porém, existem variações com intervalos de tempo ainda menores, conhecidas como pulsações. Pulsações magnéticas também chamadas de ondas de baixa frequência (ULF, do inglês *Ultra Low Frequency*), são observadas em uma faixa de frequências de aproximadamente 1mHz a 10Hz (Kamide; Chian, 2007). Variações na velocidade do vento solar e a interação dele com a magnetosfera são as principais causas de pulsações.

Atualmente, as pulsações magnéticas observadas na superfície da terra são definidas como manifestações de ondas hidromagnéticas de frequência ultrabaixa que se propagam na magnetosfera (Kamide; Chian, 2007). Ondas hidromagnéticas são originadas de perturbações (como choques e turbulências) e de instabilidades periódicas (Piassi, 2018).

Em 1958, a IAGA (International Association of Geomagnetism and Aeronomy) classificou as pulsações em duas categorias com base em sua regularidade e período de oscilações, separando-as entre pulsações contínuas (Pc) e irregulares (Pi), onde as Pc são sinais periódicos e que apresentam amplitudes bem definidas, enquanto as Pi apresentam uma grande faixa espectral. Cada categoria é dividida em relação ao seu período de ocorrência e a frequência, as pulsações contínuas são classificadas entre Pc1 e Pc5 e as irregulares são Pi1 e Pi2 (Marchezi, 2016). Em 1973 duas novas classes foram adicionadas por IAGA, as pulsações contínuas Pc6 com períodos maiores que 600s e as pulsações irregulares Pi3 com períodos maiores que 150s (Kamide; Chian, 2007).

Além da classificação das pulsações apresentada por IAGA, Samson (1991) propôs outra classificação que subdividiu as pulsações em bandas de frequência, onde cada banda é associada a possíveis fontes causadoras de pulsações magnéticas. A Tabela 2.1 representa a classificação das pulsações conforme Proposto por IAGA e Samson.

Tabela 2.1 – Pulsações contínuas e irregulares.

IAGA		Samson(1991)	
TIPO	T(s)	Banda de Frequência	Fontes (internas e externas)
Pc1	0.2 - 5	Contínuas	Alta Frequência 0.1 - 10 Hz Instabilidade ion-ciclotrônica na magnetosfera.
Pc2	5 - 10		
Pc3	10 - 45		Média Frequência 10 - 100 mHz Instabilidade próton-ciclotrônica no vento solar; instabilidade Kelvin-Helmholtz.
Pc4	45 - 150		Baixa Frequência 1 - 10 mHz Instabilidade Kelvin-Helmholtz; instabilidade de deriva de espelho; ressonância bounce.
Pc5	150 - 600		
Pi1	1 - 40	Irregulares	Instabilidade de correntes alinhadas ao campo.
Pi2	40 - 150		Mudanças abruptas na convecção na cauda; Eventos de transferência de fluxo.

Fonte: Modificado de Kamide e Chian (2007).

### 3 OBJETIVOS

Inicialmente o projeto apresenta quatro objetivos principais:

1. Investigar como o vento solar interage com a magnetosfera da Terra, utilizando índices geomagnéticos convenientes;
2. Revisão bibliográfica sobre o tema para o melhor entendimento do fenômeno e escolha dos eventos para estudo;
3. Coletar dados a partir de diversas bases de dados e realizar seu processamento e análise;
4. Analisar o comportamento dos cinturões de radiação observados na magnetosfera terrestre a partir dos dados obtidos.

Sendo que para o item 1 para analisar a interação solar-terrestre foi escolhida uma tempestade magnética e posteriormente identificadas pulsações magnéticas. O item 4 não foi realizado durante este um ano de pesquisa, sendo deixado para trabalhos futuros.

## 4 METODOLOGIA

A metodologia do trabalho se divide em 3 fases, onde primeiramente foi realizada a aquisição e o tratamento dos dados das séries temporais utilizadas. Em seguida, foram aplicadas técnicas de análise de dados utilizando a linguagem Python e logo após feito a interpretação dos resultados.

### 4.1 Aquisição de dados e tratamento

As séries temporais utilizadas neste trabalho são a componente horizontal (H) do campo magnético terrestre e norte-sul (Bz) do campo magnético interplanetário, onde estão na escala de segundos. Os dados da componente H foram adquiridos da estação magnética da Embrace MagNet localizada na cidade de Medianeira-PR (MED), enquanto os dados de Bz foram coletados do satélite ACE da NASA disponível em <https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>.

Para a manipulação dos dados, realização das análises e plotagem dos resultados foi utilizado um código em linguagem Python obtido da internet e adaptado conforme as necessidades.

A componente H teve seus dados corrigidos para a unidade de nT sendo utilizado a Equação 4.1 e a Tabela 4.1 para realizar a conversão

$$H = \frac{(H_{ASCII} * H_{LS}) + H_{LO} + H_{EO}}{H_{SV}} + H_{baseline} \quad (4.1)$$

Tabela 4.1 – Valores para calibração magnetômetro de Medianeira-PR.

$H_{LS}$	0.00029802322387
$H_{LO}$	0.000000000000001
$H_{EO}$	0.0001
$H_{SV}$	2.81
$H_{baseline}$	18621.40
$H_{ASCII}$	Valor medido no magnetômetro

Fonte: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE (2023).

Também foi feita a subtração do campo total nos dados da componente horizontal, utilizando o valor da meia-noite de H do dia considerado magneticamente calmo do conjunto de dados, a subtração seguiu a Equação 4.2. A Figura 4.1 mostra a subtração do campo total feita em linguagem Python.

$$H_i = H_i - H_{MNC} \quad (4.2)$$

$i = 0,1,2, \dots, (n-1)$

n = número de amostras

$H_{MNC}$  = Valor da meia-noite de H do dia magneticamente calmo

Figura 4.1 – Parte do código em Python feito para subtração do campo total.

```
def SUBT_CAMPO_TOTAL(dados_H):
    H_MNC = dados_H[0] # VALOR DA MEIA NOITE DO DIA MAGNETICAMENTE CALMO
    for i in range(len(dados_H)):
        dados_H[i] = dados_H[i] - H_MNC
    return dados_H
```

Fonte: Autoria própria.

Os dados da componente Bz já são obtidos em nT, sendo necessário apenas corrigir possíveis erros no conjunto. Quando identificado um erro, o valor anterior da amostra foi duplicado, conforme ilustrado na Figura 4.2, que apresenta parte do código em Python utilizado para essa correção.

Figura 4.2 – Parte do código em Python feito para corrigir erros dos dados de Bz.

```
"===== PARA O VENTO SOLAR ====="
BZ = LEITURA_WIND()

#CORRIGINDO OS ERROS DOS DADOS
for i in range(len(BZ)):
    if BZ[i]==-1.000000000000001e+31:
        BZ[i]=BZ[i-1]
```

Fonte: Autoria própria.

## 4.2 Técnicas para análise de dados

A primeira técnica utilizada foi a análise de Fourier, implementada por meio da biblioteca *scipy* do Python e da função *signal.spectrogram*, que usa a Transformada de Fourier de Curto Tempo (STFT). Diferente da Transformada de Fourier tradicional (FT), que transforma o sinal inteiro de uma vez do domínio do tempo para o domínio da frequência, a STFT divide o sinal em janelas curtas e aplica a FT em cada uma. Isso permite acompanhar como as frequências mudam ao longo do tempo, fornecendo uma análise tanto no tempo quanto na frequência. Para a plotagem do espectro de potência que retorna da função *spectrogram* foi utilizado a biblioteca *matplotlib.pyplot* e a função *pcolormesh*. A Figura 4.3 mostra parte do código em Python designado para calcular o spectrogram e realizar sua plotagem.

Figura 4.3 – Parte do código em Python que calcula o spectrogram e faz a plotagem.

```
-----> FUNÇÃO SPECTROGRAM <-----  
def SPECTROGRAM(dados_H):  
    fs = 1 # frequência de amostragem  
    # Calcular o espectrograma  
    dados_H=np.array(dados_H)  
    frequencias, times, Sxx = signal.spectrogram(dados_H, fs, window="hann", nperseg=2000, noverlap=1000, nfft=3601, scaling="density", mode="psd")  
  
    # CONVERTENDO times EM DIAS  
    start_date = datetime(year=2022, month=7, day=0, hour=0, minute=0)  
    time_in_day = [start_date + timedelta(seconds=day) for day in times]  
    return frequencias, time_in_day, Sxx  
  
-----> FUNÇÃO GRÁFICO SPECTROGRAM <-----  
def GRAFICO_SPECT(temp, freq, Sxx):  
  
    plt.pcolormesh(*args: temp, freq, 10 * np.log10(Sxx)) # Escala em dB  
    plt.title('Espectrograma')  
    plt.xlabel('Year_2022_Month_Day_Hour')  
    plt.ylabel('Frequência (Hz)')  
    plt.colorbar(label='Potência Espectral (dB)')
```

Fonte: Autoria própria.

Também foi aplicado um filtro aos dados, sendo usado a biblioteca *scipy.signal* e as funções *butter* e *lfilter*. O filtro escolhido foi do tipo passa-faixa, onde foram definidos os limites de frequência inferior e superior para a sua aplicação. A Figura 4.4 mostra como foi empregado no código.

Figura 4.4 – Parte do código em Python responsável pelo filtro.

```
-----> FUNÇÃO FILTRO <-----  
# Função para projetar e aplicar um filtro  
def FILTRO(sinal, frequencia_de_corte, ordem=2):  
    nyq=0.5*1 # (fs/2)  
    low=frequencia_de_corte[0]/nyq  
    high=frequencia_de_corte[1]/nyq  
    b, a = butter(ordem, Wns=[low,high], btype='band') # cria o filtro e retorna os parametros a serem usados para aplicar o filtro  
    sinal_filtrado = lfilter(b, a, sinal) #aplica o filtro  
    return sinal_filtrado
```

Fonte: Autoria própria.

Em sequência, a análise wavelet foi aplicada aos dados usando a biblioteca *pycwt* e a função *wavelet.cwt*, os dados foram normalizados subtraindo o valor médio e dividindo pelo desvio padrão, a wavelet mãe usada foi a Morlet, escolhida devido a sua capacidade de capturar comportamentos oscilatórios e variações de amplitude. A Figura 4.5 apresenta a aplicação no código.

Figura 4.5 – Parte do código em Python responsável a análise wavelet.

```

"----- ANALISE WEVELET -----"
import pycwt as wavelet

#PERIODO A PARTIR DE 10s
dt = 1
dj = 0.1 # Resolução da escala
s0 = 10 * dt # Escala inicial
J = 7/dj #int(np.log2(600 * dt / s0) / dj) # Número total de escalas
alpha, _, _ = wavelet.ar1(H_data_filtrado) # Autoconexão Lag-1 para ruído vermelho
n=len(H_data_filtrado)

#---NORMALIZANDO OS DADOS SUBTRAINDO O VALOR MEDIO E DIVIDINDO PELO DESVIO PADRÃO

sub_Hmean=(H_data_filtrado - np.mean(H_data_filtrado))
std=np.std(sub_Hmean)
H_data_norm = sub_Hmean/std

#-----TWC
mother = wavelet.Morlet(6)
wave, scales, freqs, coi, fft, fftfreqs = wavelet.cwt(H_data_norm, dt, dj, s0, J, mother)

# -----Calcule o espectro de potência wavelet

power = (np.abs(wave)) ** 2
fft_power = np.abs(fft) ** 2
period = 1 / freqs

#---- teste de significancia do espectro de potencia

signif, fft_theor = wavelet.significance(signal=1.0, dt, scales, sigma_test=0, alpha,
                                       significance_level=0.95,
                                       wavelet=mother)
sig95 = np.ones([1, n]) * signif[:, None]
sig95 = power / sig95 # Onde razão > 1, o poder é significativo

```

Fonte: Autoria própria.

Por fim, a última análise usada foi a wavelet cruzada, também usando a biblioteca *pycwt* mas com a função *wavelet.xwt*, os dados da componente H e Bz foram normalizados como informado anteriormente, a Figura 4.6 apresenta o uso no código.

Figura 4.6 – Parte do código em Python responsável pela wavelet cruzada.

```

----- XWT (calcula wavelet cruzada) -----
# Calcule a transformada wavelet cruzada (XWT). O XWT encontra regiões
# no espaço de frequência de tempo onde as séries temporais apresentam
# alto poder comum. Torrence e Compo (1998) afirmam que a função de ponto
# percentual - PPF (inverso da função de distribuição cumulativa) - de uma
# distribuição qui-quadrado com 95% de confiança e dois graus de liberdade
# é Z2(95%)=3,999. No entanto, calcular o PPF usando chi2.ppf dá Z2(95%)=5,991.
# Para garantir intervalos de significância semelhantes aos de Grinsted et al. (2004),
# deve-se utilizar confiança de 86,46%.

Wave_H_BZ, cruzada_coi, freq_H_BZ, signif_H_BZ = wavelet.xwt(H_data_norm, BZ_data_norm, dt, dj, s0, J, significance_level=0.8646, wavelet=mother, normalize=False)
# NORMALIZE É FALSE POIS OS DADOS JA FORAM NORMALIZADOS PELO DESVIO PADRÃO

cruzada_power = np.abs(Wave_H_BZ)**2 # POTENCIA CRUZADA
cruzada_sig = np.ones([1, n]) * signif_H_BZ[:, None]
cruzada_sig = cruzada_power / cruzada_sig # A potência é significativa quando a proporção é > 1
cruzada_period = 1/freq_H_BZ

##### GRAFICOS WEVELET CRUZADA #####

# plt.close("all") #fecha todos os graficos
figprops = dict(figsize=(11, 8), dpi=72)
fig = plt.figure(**figprops)

----- PLOT WEVELET CRUZADA -----
ax=plt.axes([0.1, 0.68, 0.72, 0.28])

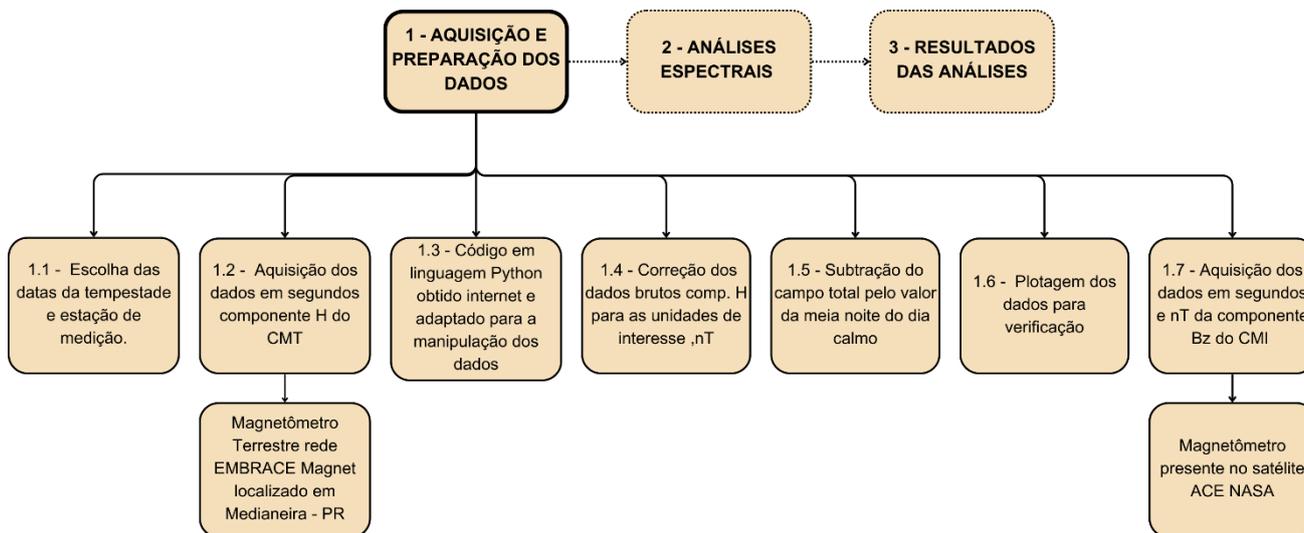
levels = np.linspace(-25, np.log2(cruzada_power.max()), num=80)
im = ax.contourf(time, np.log2(cruzada_period), np.log2(cruzada_power), levels=levels, cmap="jet", extend="min") # ESPECTRO CRUZADO
cbar_ax= plt.axes([0.865, 0.68, 0.0125, 0.28])
cbar=plt.colorbar(im, cax=cbar_ax, orientation="vertical")
cbar.set_label("Log2(Power)")
ax.set_xlim([datetime(year=2022, month=7, day=7, hour=4, minute=0, second=0), datetime(year=2022, month=7, day=8, hour=12, minute=0, second=0)])

```

Fonte: Autoria própria.

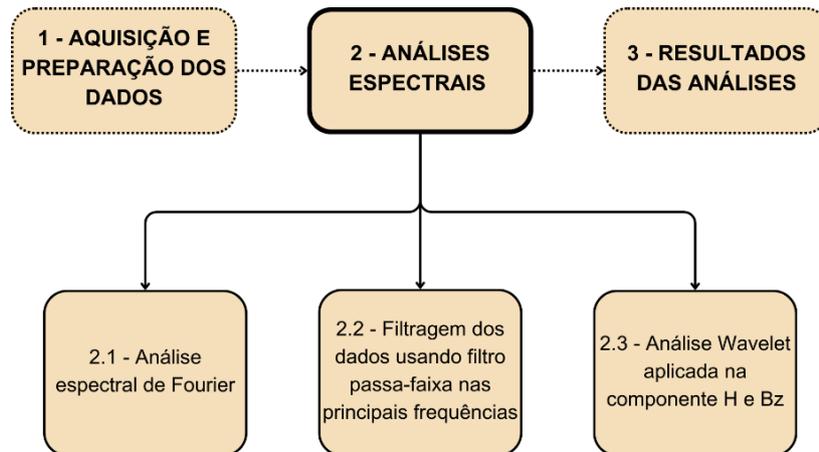
Os fluxogramas apresentados nas Figura 4.7, Figura 4.8 e Figura 4.9 mostram resumidamente os passos seguidos na metodologia deste trabalho.

Figura 4.7 – Fluxograma fase 1 da metodologia do projeto.



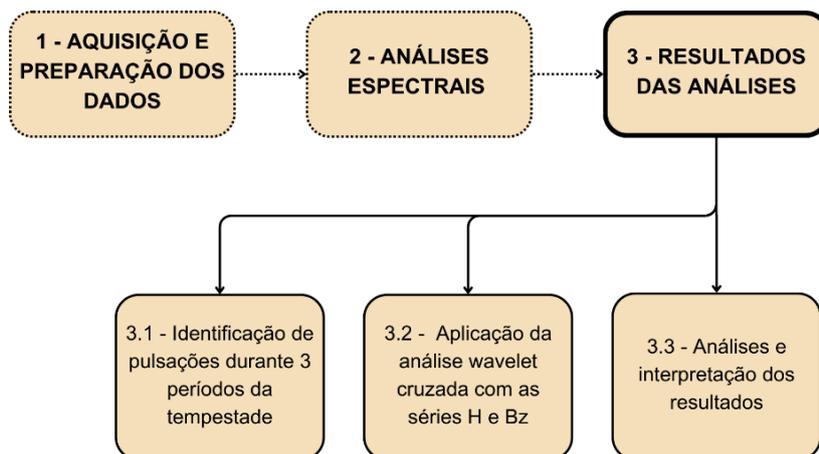
Fonte: Autoria própria.

Figura 4.8 – Fluxograma fase 2 da metodologia do projeto.



Fonte: Autoria própria.

Figura 4.9 – Fluxograma fase 3 da metodologia do projeto.



Fonte: Autoria própria.

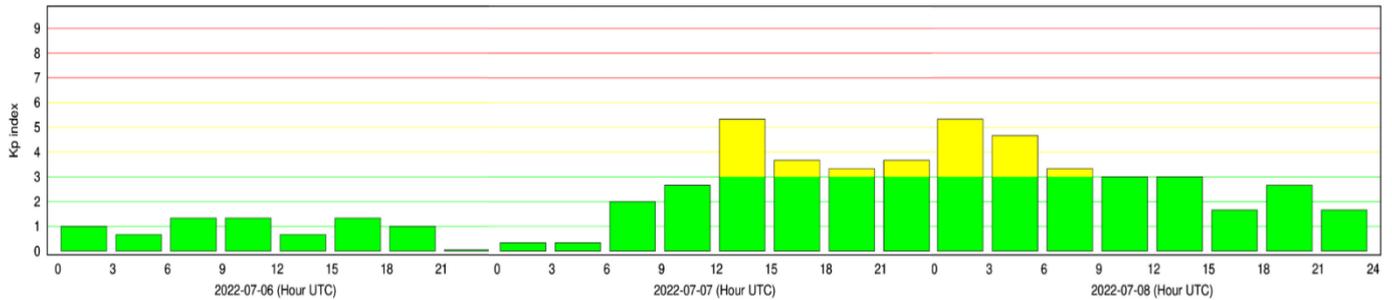
## 5 RESULTADOS

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos após a aplicação das metodologias descritas. Inicialmente, são mostrados os dados da tempestade magnética estudada, seguidos da análise da componente H utilizando as técnicas de Fourier e wavelet. Em seguida, são discutidos os resultados das análises filtradas por faixa de frequência. Por fim, é apresentada a análise wavelet cruzada, que foi utilizada para verificar as correlações entre as séries temporais.

## 5.1 Tempestade magnética e séries temporais utilizadas

A tempestade utilizada neste projeto ocorreu entre os dias 07/07/2022 e 08/07/2022 considerando dia 06/07/2022 como o dia magneticamente calmo. Sua intensidade é classificada como escala G1 por apresentar um índice  $K_p = 5$  conforme mostrado na Figura 5.1, nesta Figura é possível visualizar que a tempestade ocorreu no período noturno.

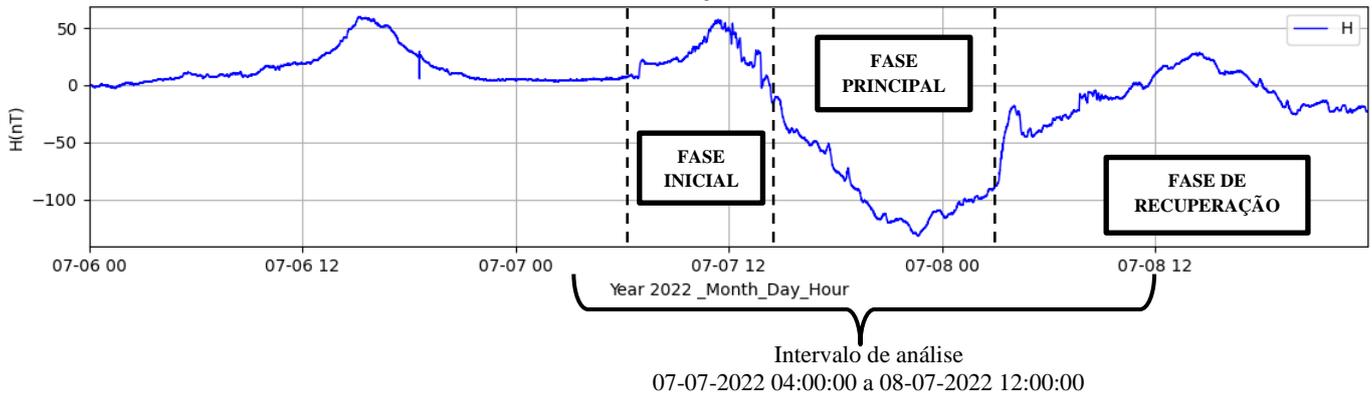
Figura 5.1 – Índice  $K_p$  durante os três dias de dados.



Fonte: GFZ Helmholtz-Zentrum Potsdam (2023).

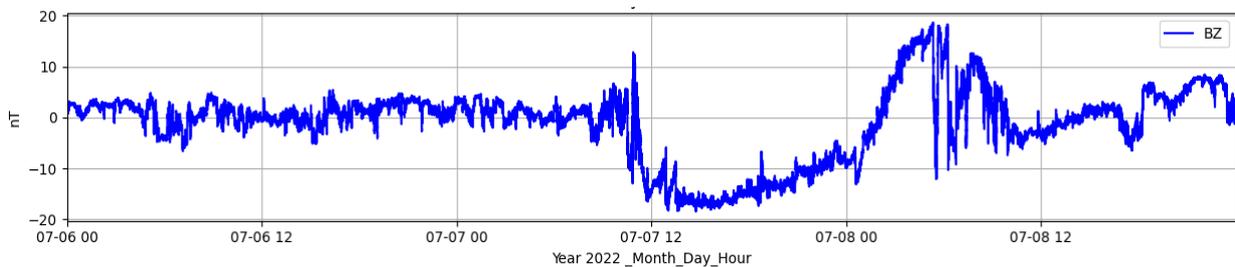
As séries temporais utilizadas foram a componente H onde sua variação está apresentada na Figura 5.2 e a componente Bz apresentada na Figura 5.3. Através da variação da componente H é possível identificar as fases da tempestade magnética, na fase inicial observa-se o aumento da componente causado pelo choque do vento solar na magnetosfera terrestre, seguida da fase principal e de recuperação da tempestade. Uma tempestade magnética também é considerada quando o índice Dst está abaixo de -50 nT sendo que para esta tempestade durante a fase principal o índice Dst atingiu -80 nT. O intervalo de análise do projeto irá compreender as 4h do dia 07/07/2022 até as 12h do dia 08/07/2022. Em relação a componente Bz durante um determinado período sua variação apresenta valores negativos o que significa que a componente está voltada para sul o que é um indicativo de tempestade magnética também.

Figura 5.2 – Componente H do Campo Magnético Terrestre (MED).



Fonte: Autoria própria.

Figura 5.3 – Componente BZ do Campo Magnético Interplanetário (ACE).



Fonte: Autoria própria

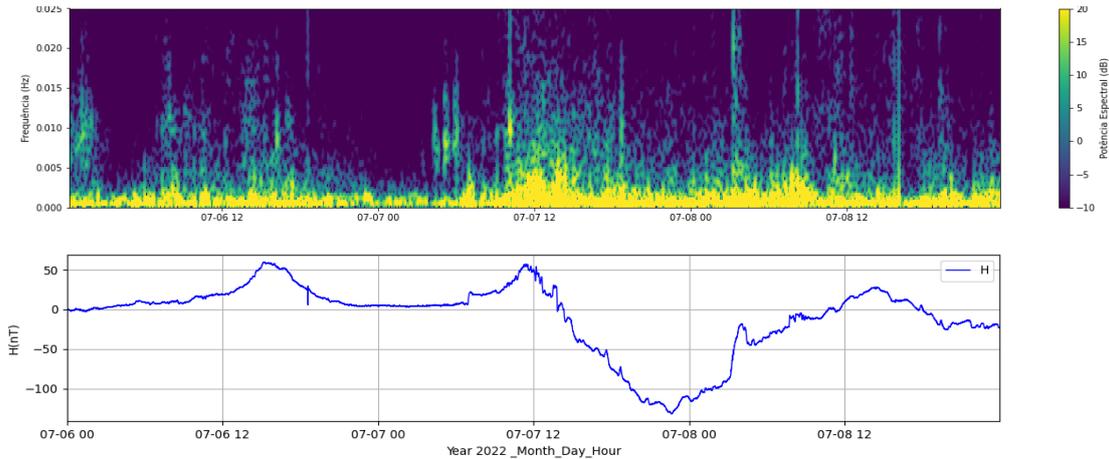
## 5.2 Espectros de potência da componente H

Com o intuito de identificar pulsações magnéticas, análises espectrais foram aplicadas aos dados, como a análise de Fourier e a análise wavelet, obtendo os resultados apresentados abaixo.

### 5.2.1 Espectro de Fourier e identificação das principais faixas de frequência

O primeiro espectro de potência calculado está apresentado na Figura 5.4, onde foi utilizado análise de Fourier. Neste espectro é possível identificar onde se localizam as maiores manifestações de potência, sendo que estão presentes no período que compreende a ocorrência da tempestade magnética. Também é possível identificar as faixas de frequência em que as pulsações ocorrem, para este projeto frequências que estão abaixo de 3 mHz serão desconsideradas por se tratar de um ruído intenso, com isso, foi identificada duas principais faixas de frequência, sendo que a faixa 1 compreende de 3 a 8 mHz e a faixa 2 de 8 a 16 mHz.

Figura 5.4 – Espectro Fourier da potência e variação da componente H CMT(MED).

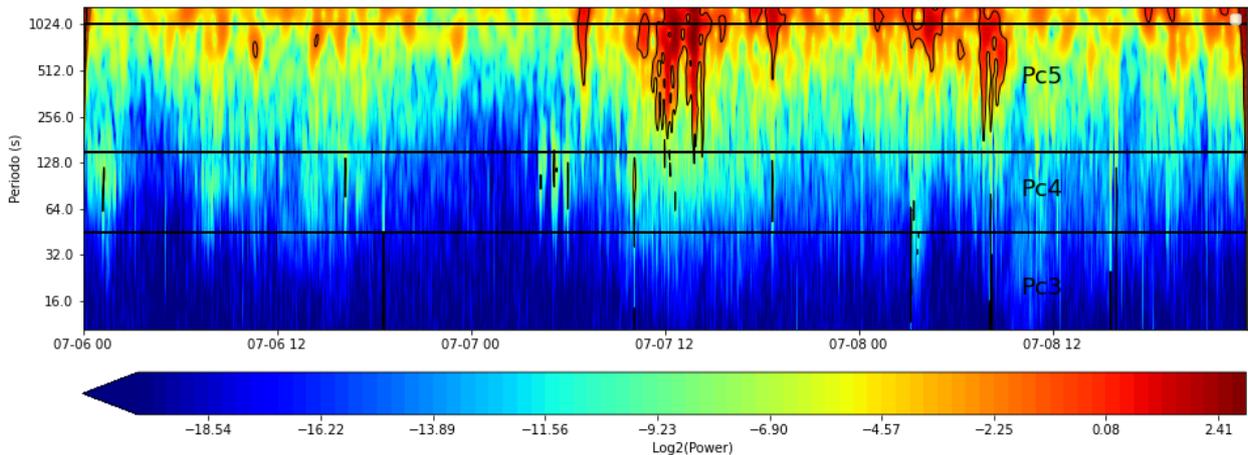


Fonte: Autoria própria.

### 5.2.2 Espectro wavelet e identificação de pulsações magnéticas

Após a análise de Fourier, para melhorar a resolução da potência em relação ao tempo versus frequência e posteriormente identificar pulsações magnéticas, a análise wavelet foi aplicada na série temporal resultando na Figura 5.5. Neste espectro, os períodos em que as pulsações ocorrem já estão divididos e identificados, o limite superior da Pc5 foi aumentado para melhor visualização, sendo que é possível identificar manifestações de pulsações do tipo Pc4 e Pc5.

Figura 5.5 – Espectro de potência wavelet componente H CMT (MED).

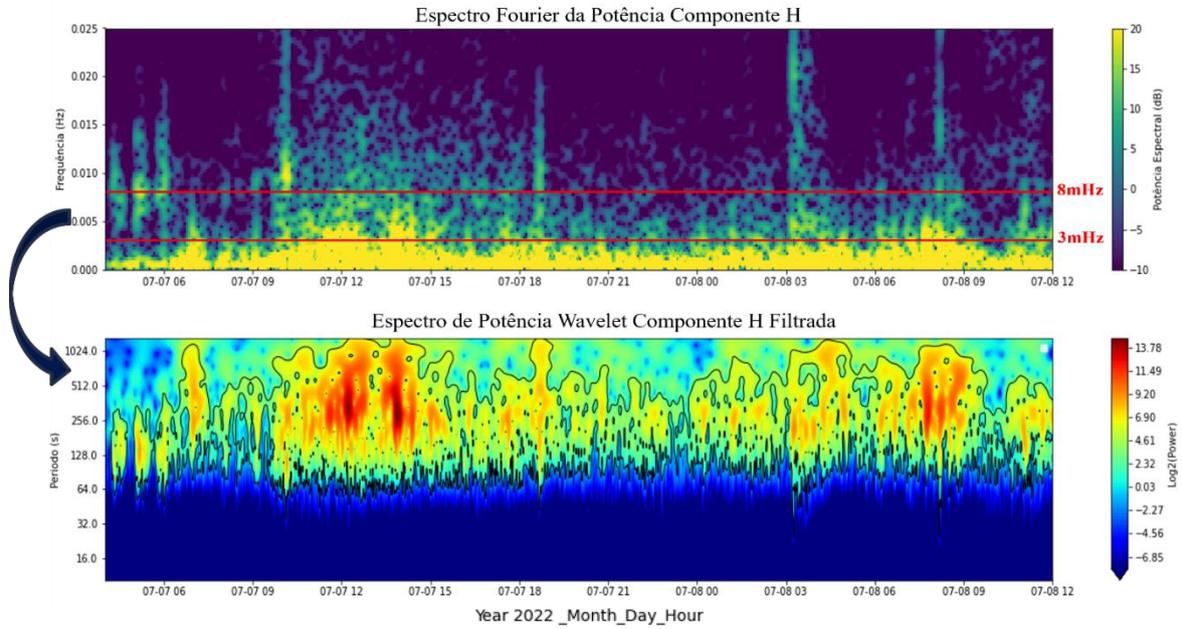


Fonte: Autoria própria.

Logo em seguida, os dados foram filtrados utilizando filtro passa-faixa com os limites de frequência sendo as duas principais faixas de frequência encontradas anteriormente e

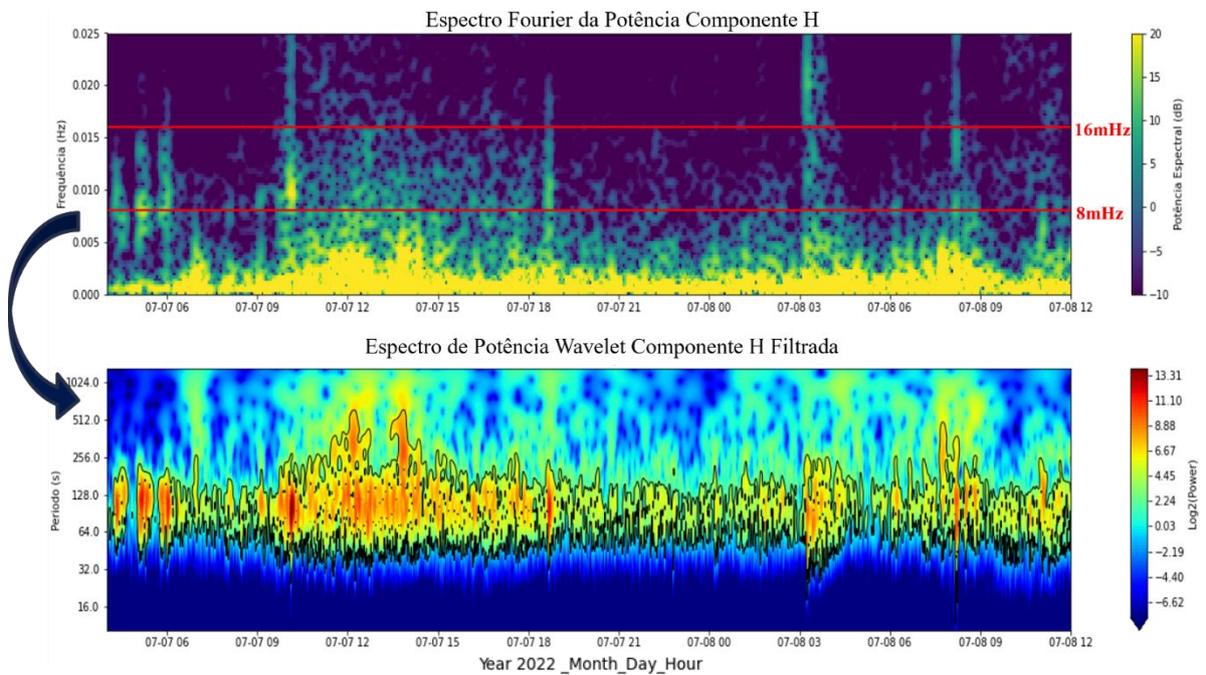
os resultados mostrados na Figura 5.6 e Figura 5.7. A partir daqui todos os resultados mostrados são referentes ao intervalo de análise do projeto apenas.

Figura 5.6 – Resultado filtro de frequência na faixa 1.



Fonte: Autoria própria.

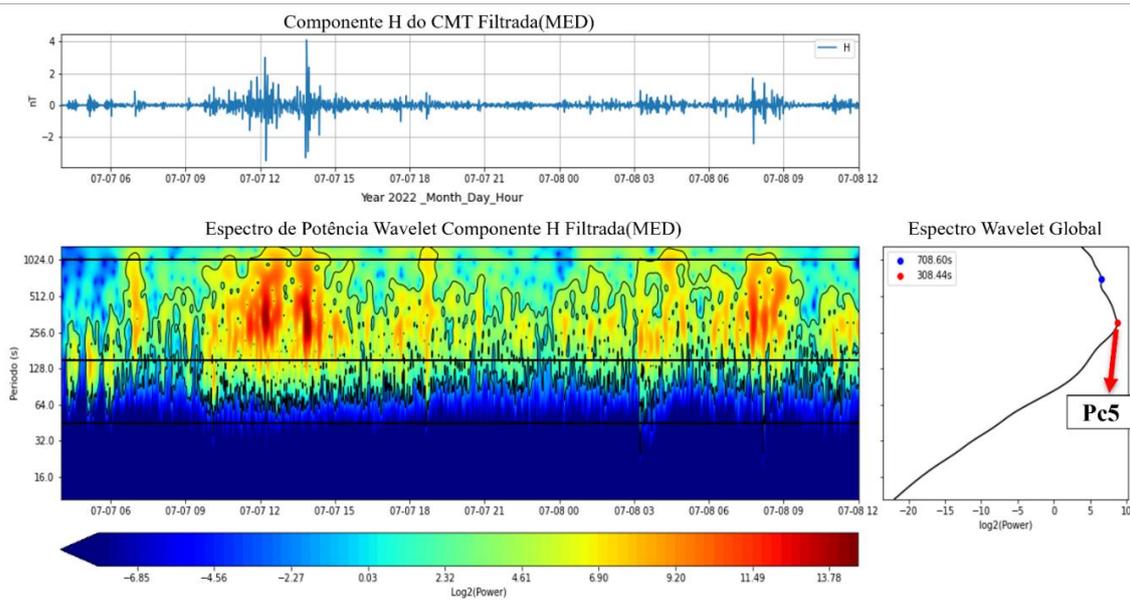
Figura 5.7 – Resultado filtro de frequência na faixa 2.



Fonte: Autoria própria.

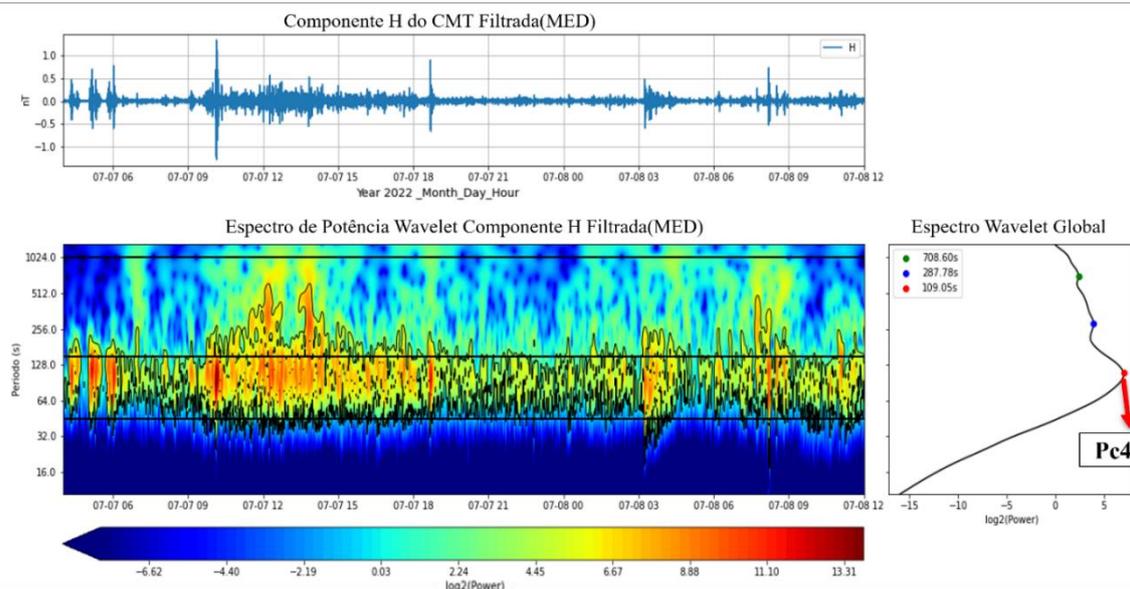
No espectro wavelet é possível identificar pulsações na fase inicial e de recuperação da tempestade em ambos os filtros, porém sendo mais intenso na faixa de 3 a 8 mHz. Para identificar os períodos em que estas principais pulsações ocorrem foi calculado o espectro wavelet global apresentado na Figura 5.8 e Figura 5.9, onde foram encontrados períodos correspondentes a 308,44s para a Pc5 e 109,05s para Pc4.

Figura 5.8 – Identificação do período de pulsações Pc5.



Fonte: Autoria própria.

Figura 5.9 – Identificação do período de pulsações Pc4.

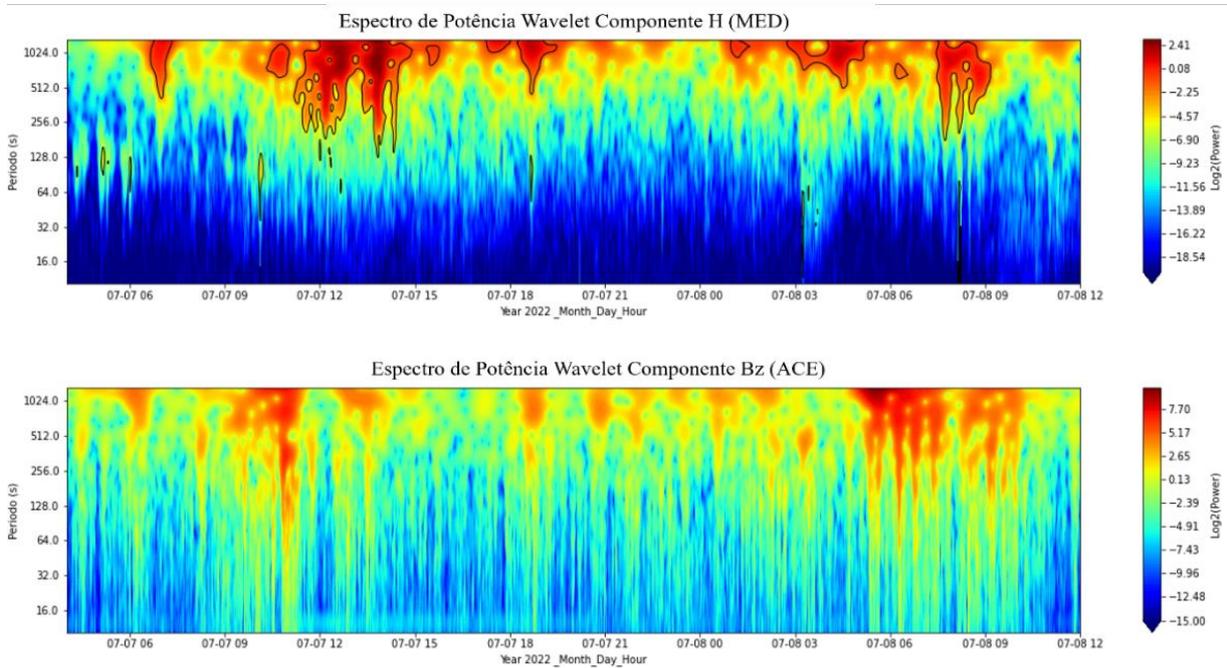


Fonte: Autoria própria.

### 5.3 Análise wavelet cruzada

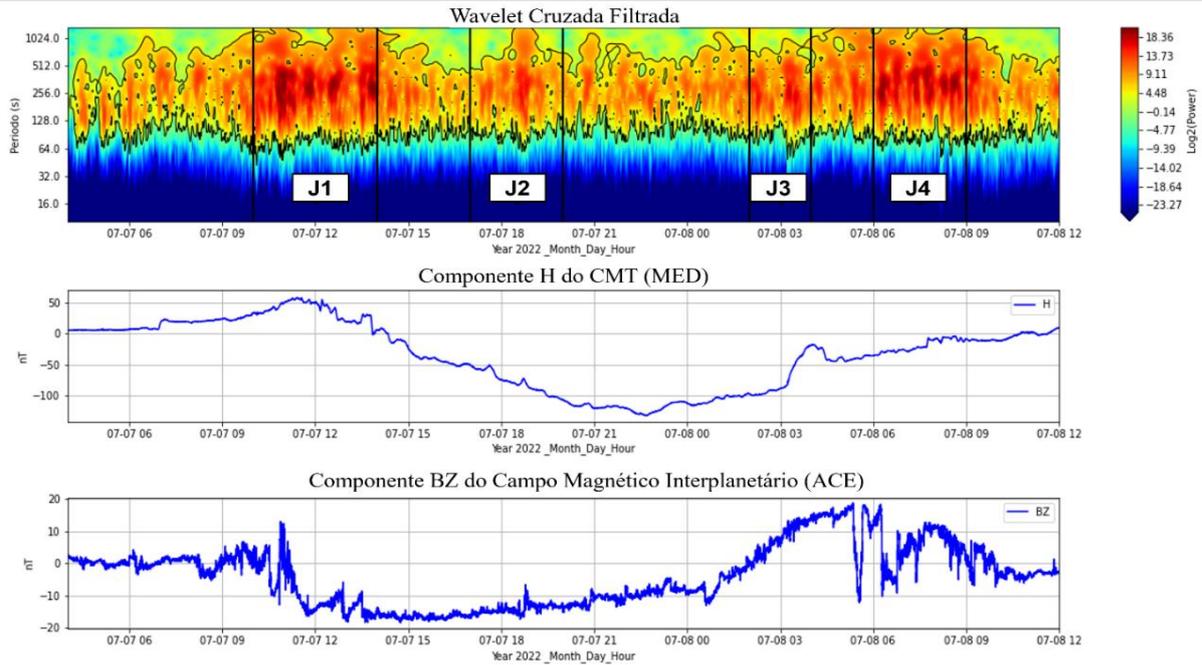
Após a identificação das pulsações magnéticas, foi aplicado entre as componentes H e Bz a análise wavelet cruzada afim de comprovar a correlação entre elas e mostrar a influência do vento solar na magnetosfera terrestre. Os espectros de potência wavelet das duas componentes estão apresentados na Figura 5.10, observa-se que ambos os espectros apresentam assinaturas semelhantes. A análise cruzada foi aplicada nos dados filtrados nas duas faixas de frequência obtendo os resultados da Figuras 5.11 e Figura 5.13.

Figura 5.10 – Espectros de potência das componentes H e Bz.



Fonte: Autoria própria.

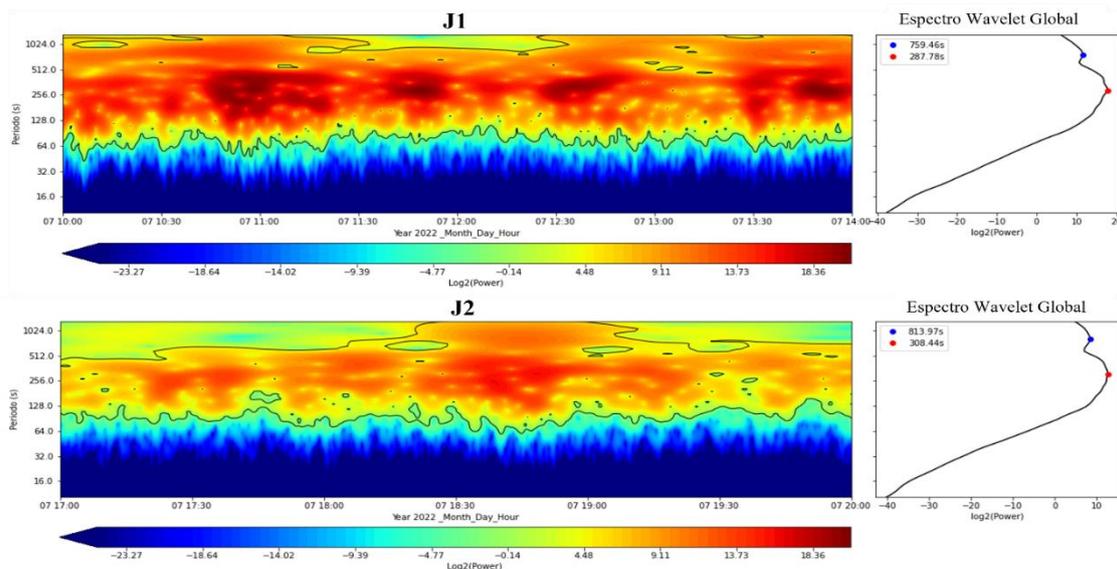
Figura 5.11 – Análise wavelet cruzada filtro de 3 a 8 mHz.



Fonte: Autoria própria.

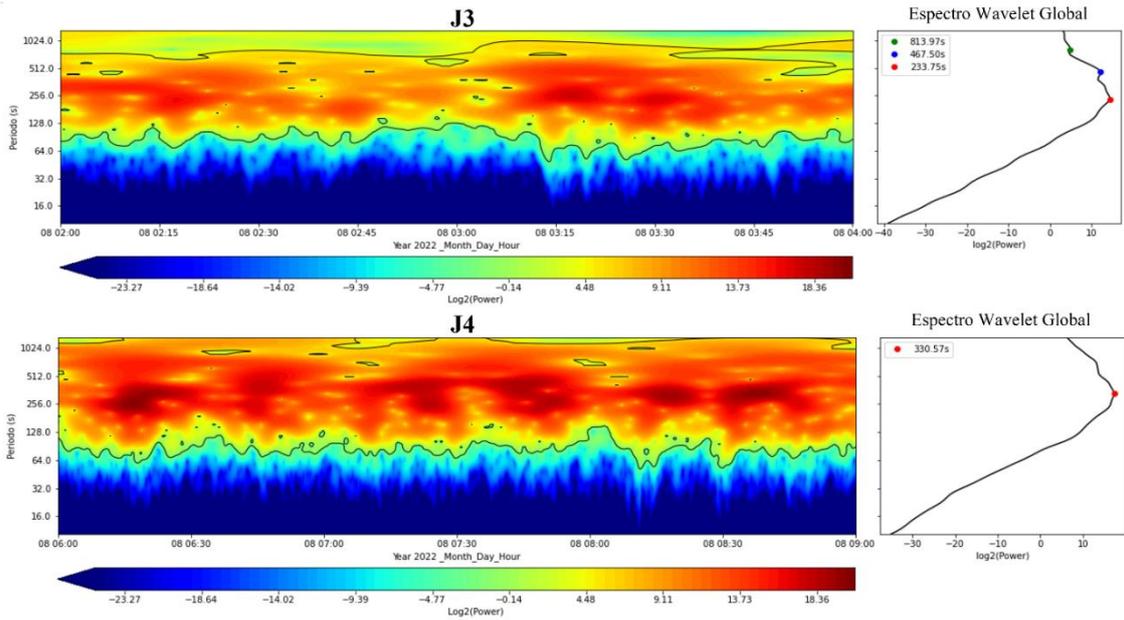
O espectro da wavelet cruzada foi dividido em quatro janelas onde se encontravam as maiores correlações, sendo que a janela J1 corresponde a fase inicial da tempestade, J2 fase principal e J3 e J4 fase de recuperação. Para cada janela foi calculado o período da maior correlação como apresentado na Figura 5.12 e Figura 5.14.

Figura 5.12 – Períodos identificados de maior correlação em cada janela filtro 3 a 8 mHz



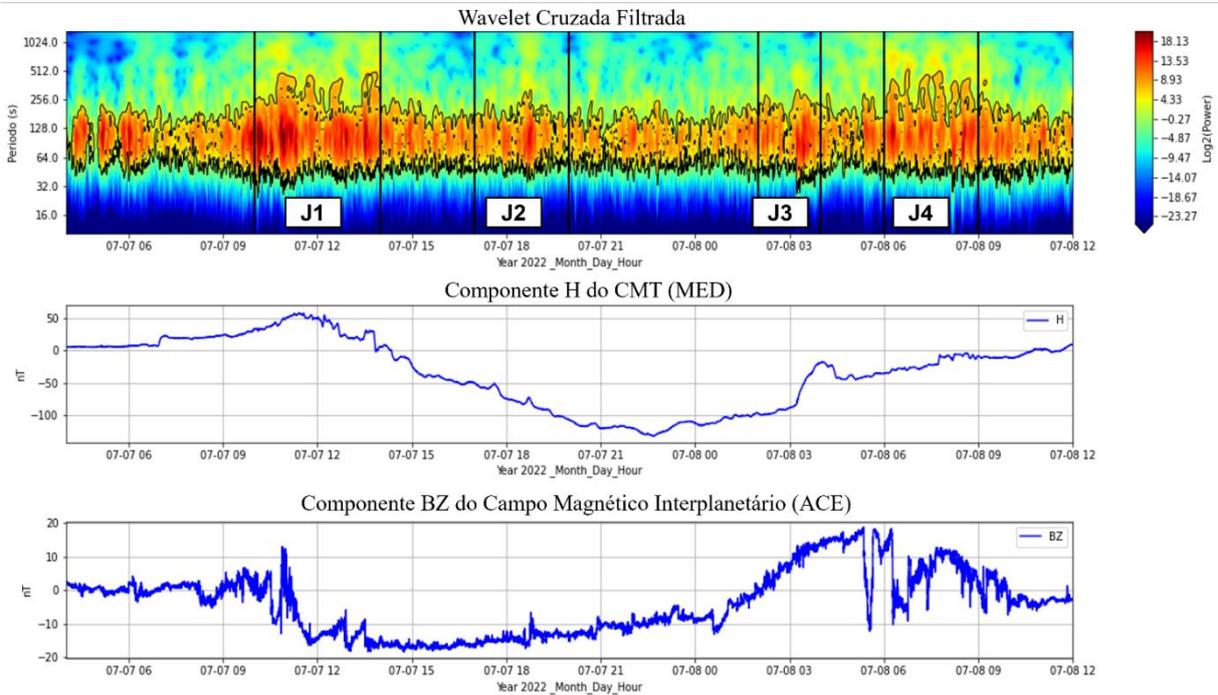
Fonte: Autoria própria.

Figura 5.12 – Continuação



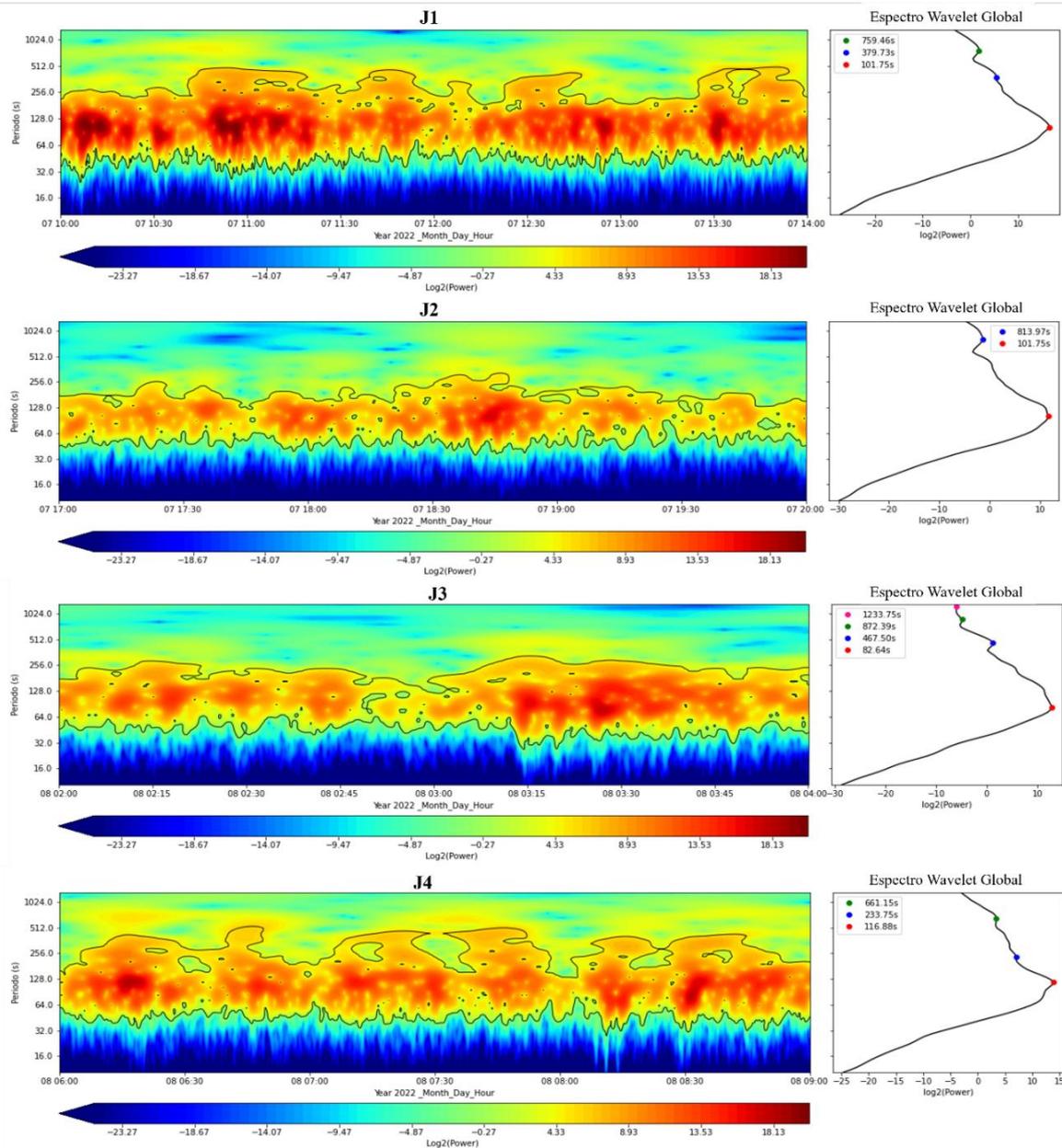
Fonte: Autoria própria.

Figura 5.13 – Análise wavelet cruzada filtro de 8 a 16 mHz.



Fonte: Autoria própria.

Figura 5.14 – Períodos identificados de maior correlação em cada janela filtro 8 a 16 mHz.



Fonte: Autoria própria.

Para melhor comparação, os períodos das maiores correlações estão quantificados na Tabela 5.1 e Tabela 5.2, junto a elas estão os períodos das pulsações encontradas nas mesmas janelas apenas para a componente H afim de comparar os dois resultados. É possível identificar períodos que se repetem em ambas as análises como o pico de 101,75s no filtro de 8 a 16 mHz.

Tabela 5.1 – Períodos das maiores correlações e pulsações no filtro 3 a 8 mHz.

Janela	Wavelet Cruzada		Componente H (MED)	
	Período(s)	Potência	Período(s)	Potência
<b>J1</b>	287,78	17,77	308,44	11,23
	759,46	11,57	759,46	8,79
<b>J2</b>	308,44	12,58	268,51	6,5
	813,97	8,36	1151,13	5,25
<b>J3</b>	233,75	14,04	218,1	6,93
	467,5	12,16	935	4,99
	813,97	4,76		
<b>J4</b>	330,57	17,35	354,3	9,12

Fonte: Autoria própria.

Tabela 5.2 – Períodos das maiores correlações e pulsações no filtro 8 a 16 mHz.

Janela	Wavelet Cruzada		Componente H (MED)	
	Período (s)	Potência	Período (s)	Potência
<b>J1</b>	101,75	16,5	101,75	9,05
	379,73	5,46	287,78	6,45
	759,46	1,77	759,46	4,72
<b>J2</b>	101,75	11,65	101,75	6,93
	813,97	-1,35	467,5	1,39
			1151,13	1,37
<b>J3</b>	82,64	12,8	88,58	6,18
	467,5	1,25	935	1,06
	872,39	-4,88		
<b>J4</b>	116,88	13,81	77,11	5,04
	661,15	3,36	116,88	6,27

Fonte: Autoria própria.

## **6 DISCUSSÃO E CONCLUSÃO**

Com os resultados obtidos é possível afirmar que as maiores correlações ocorrem nas janelas J1 e J4 que correspondem a fase inicial e de recuperação da tempestade em ambos os filtros. Os períodos encontrados acima de 600s estão descartados por estar acima do limite de pulsações do tipo Pc5 e se tratar de um sinal anômalo o qual os filtros não foram capazes de atenuar.

Com a análise wavelet cruzada foi encontrado que os períodos de maior potência também correspondem aos períodos em que as pulsações na componente H atingiram a maior potência, com isso, a análise entre as componente H e Bz mostra que as correlações mais significativas ocorreram na fase inicial da tempestade tanto para a Pc4 quanto para Pc5, seguida da fase de recuperação para ambas as pulsações.

A identificação de pulsações na fase de recuperação da tempestade é algo incomum, indicando que essas pulsações são geradas pela variabilidade da componente Bz. Levanta-se a hipótese de que essa variação seja causada pelo vento solar rápido ou pela chegada de outra estrutura conhecida na magnetosfera, porém, as duas suposições foram descartadas, com isso, a estrutura que causou as pulsações na fase de recuperação não é conhecida.

As pulsações identificadas neste trabalho mostram o impacto que elas podem causar em satélites próximos à terra devido as variações que elas causam no campo magnético da Terra. Estas variações podem induzir correntes elétricas nos componentes eletrônicos dos satélites o que causa danos e reduzir sua vida útil. As pulsações também podem afetar a ionosfera, interferindo na propagação de sinais de rádio e comunicação por satélite, gerando problemas de navegação como erros de posicionamento em sistemas de GPS.

## **7 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS**

Com os resultados obtidos neste trabalho, fica sugestões futuras como buscar justificativas físicas para os resultados encontrados, fazer uma análise das fontes geradoras das pulsações identificadas e identificar a estrutura causadora da variação de Bz na fase de recuperação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAMPBELL, W.H. **Introduction to geomagnetic fields**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.

COLORADO. **Wavelet analysis; significance levels; confidence intervals**. Disponível em: <https://atoc.colorado.edu/research/wavelets/>. Acesso em: 10 jan. 2024.

GFZ Helmholtz-Zentrum Potsdam. **KP index daily plots**. 2023. Disponível em: <https://kp.gfz-potsdam.de/en/figures/kp-daily-plots>. Acesso em: 15 out. 2023.

KAMIDE, Y.; CHIAN, A. C. L. **Handbook of the solar-terrestrial environment**. New York: Springer, 2007.

KANE, R. P. Sun–Earth relation: Historical development and present status—A brief review. **Advances in Space Research**, v. 35, n. 5, p. 866-881, 2005.

MARCHEZI, J. P. **Identificação de pulsações geomagnéticas detectadas na rede de magnetômetros de Embrace**. 2016. 174 p. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2016.

MORAIS, L. M. G. **Estudo da variabilidade dos índices geomagnéticos Kp (global) e Ksa (regional) durante tempestades magnéticas e períodos calmos**. 2023. 157 p. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2023.

OLSEN, N.; STOLLE, C. Satellite geomagnetism. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**, v. 40, n. 1, p. 441-465, 2012.

ÖZTÜRK, M. Kaan. Trajectories of charged particles trapped in Earth's magnetic field. **American Journal of Physics**, v. 80, n. 5, p. 420-428, 2012

PIASSI, A. R. **Análise de pulsações magnéticas Pc3 e Pc4 na região da Anomalia Magnética do Atlântico Sul**. 2018. 137 p. Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial/Ciências do Ambiente Solar-Terrestre) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2018.

PyCWT. **Spectral analysis using wavelets in Python**. Disponível em: <<https://pycwt.readthedocs.io/en/latest/>>. Acesso em: 10 jan. 2024.

SAMSON, J. C. Geomagnetic pulsations and plasma waves in the earth's magnetosphere. In: JACOBS, J. A. (Ed.). **Geomagnetism**. London: Academic Press, 1991. p. 481–592.

TORRENCE, C.; COMPO, G. P. A practical guide to wavelet analysis. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 79, n. 1, p. 61–78, 1998.

WACKLER, T. National Science and Technology Council; **National Space Weather Strategy Notices**. Federal Register, vol. 80. No. 83, page. 24296-24297, 2015.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE. **Embrace: Programa de Monitoramento e Previsão do Clima Espacial**. Disponível em: <https://www2.inpe.br/climaespacial/portal/pt/>. Acesso em: 20 out. 2023.