



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

ESTUDO DAS ONDAS ULF NA MAGNETOSFERA DE VÊNUS

João Carlos de Moura Castro Neto

Relatório de Iniciação Científica do
programa PIBIC, orientado pelo Dr. Ezequiel
Echer.

Universidade Federal de Jataí

Jataí – GO

2021



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

ESTUDO DAS ONDAS ULF NA MAGNETOSFERA DE VÊNUS

João Carlos de Moura Castro Neto

Relatório de Iniciação Científica do
programa PIBIC, orientado pelo Dr. Ezequiel
Echer.

Universidade Federal de Jataí

Jataí - GO

2021

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE pela oportunidade da bolsa de iniciação científica.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pelo auxílio financeiro.

Ao meu orientador Dr. Ezequiel Echer, pelo apoio ao desenvolvimento do trabalho.

A minha coorientadora Dra. Adriane Marques de Souza Franco, pelo auxílio para o bom entendimento do tema do projeto.

Ao meu coorientador Dr. Mauricio José Alves Bolzan, por prestar o Laboratório de Astronomia e Física de Jataí a fim de terminar o projeto.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	INTRODUÇÃO	1
1.2	OBJETIVOS.....	1
2	MAGNETOSFERA INDUZIDA DE VÊNUS.....	2
2.1	FRENTE DE CHOQUE.....	3
2.2	BAINHA MAGNÉTICA.....	3
2.3	FRONTEIRA DE ACÚMULO MAGNÉTICO E BARREIRA MAGNÉTICA	4
2.4	FRONTEIRA FOTOELÉTRICA OU IONOPAUSA	4
3	INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA DE ANÁLISE.....	4
3.1	CCATI.....	5
3.2	TRANSFORMADA DE WAVELET (TW).....	7
4	RESULTADOS.....	9
4.1	IDENTIFICAÇÃO AS FRONTEIRAS	9
4.2	IDENTIFICAÇÃO DAS PRINCIPAIS FREQUÊNCIAS DE ONDAS ULF.....	11
5	CONCLUSÃO.....	13
	REFÊNCIAS.....	15

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ilustração da região especial da magnetosfera induzida de Vênus.	2
Figura 2 - Exemplo de uma órbita de cruzamento da VEX na magnetosfera venusiana.	6
Figura 3 - Gráfico dos dados do cruzamento do dia 07/02/2011 feito pela VEX.	7
Figura 4 – Transformada de Wavelet nos dados de 09/03/2008. a) Densidade b) Espectro da Wavelet c) Espectro Global de Wavelet.	9
Figura 5 – Gráfico gerado pelo CCATI com dados de 7 de fevereiro de 2011 e linhas com representação de cada fronteira.	10
Figura 6 – Gráfico transformada de Wavelet nos dados de 09/07/2008 com os principais períodos encontrados. a) Densidade b) Espectro da Wavelet c) Espectro Global de Wavelet.	12
Figura 7 -Histograma com os intervalos de principais frequências encontradas na região da bainha magnética de Vênus nos anos de 2006 a 2008.	13

RESUMO

Um estudo de análise das principais frequências ondas de frequência ultra-baixa (do inglês, *ultra-low frequency*, ULF) presentes na bainha magnética de Vênus foi desenvolvido ao longo deste trabalho. Essas ondas são geradas pouco acima da região da frente de choque de uma magnetosfera, formadas por oscilações de íons e elétrons, assim, quando energizados o suficiente, são refletidos na fronteira e transportados para regiões abaixo da frente de choque com o fluxo turbulento da bainha magnética. Utilizando os equipamentos ASPERA-4 (*Analyzer of Space Plasmas and Energetic Atoms*) e MAG (*Magnetometer*) a bordo da espaçonave *Venus Express* (VEX), foi possível identificarmos as fronteiras dos ambientes de plasma da magnetosfera venusiana e encontrar a região da bainha magnética no cruzamento da VEX. Posteriormente, a transformada de wavelet foi aplicada em dados de densidade de elétrons nessa região e as principais frequências de ondas ULF foram identificadas. Neste trabalho, identificamos os cruzamentos da VEX nos anos de 2011 e 2012 e encontramos os principais range das ondas ULF entre 2006 e 2008, com um total de 330 cruzamentos analisados e 512 períodos identificados. Finalmente, as principais frequências observadas estiveram na faixa de 5-20 mHz.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Introdução

O meio interplanetário é estudado há décadas, principalmente, no que tange a interação do vento solar com os planetas do nosso sistema solar. Observamos que ao longo dos estudos que a partir dessa interação formam-se as magnetosferas planetárias, as quais são vistas nos planetas do nosso sistema solar (ECHER, 2010). O vento solar, sendo um plasma composto por íons de hidrogênio e elétrons, é ejetado pela coroa solar e viaja em uma velocidade supermagnetosônica pelo meio interplanetário e, se durante essa viagem, estiver um obstáculo (planetas, cometas, luas, entre outros) ocorrer uma interação, forma-se então uma região espacial chamada de magnetosfera. Desse modo, podemos dividir essas magnetosferas em intrínsecas e induzidas (GOLD, 1959; PODGORNY, DUBININ e ISRAELEVICH, 1980; LUHMANN, LEDVINA e RUSSELL, 2004).

De forma geral, as magnetosferas intrínsecas são formadas em planetas que possuem um campo magnético próprio, como a Terra. O campo magnético trabalha como uma “barreira” para o vento solar, fazendo esse ser defletido em torno do planeta. Para as magnetosferas induzidas, essa interação é formada a partir da região de condutividade elétrica do planeta como, por exemplo, na região da ionosfera. Sabemos que apenas os planetas Vênus e Marte do nosso sistema solar não possuem campo magnético próprio (LUHMANN, LEDVINA e RUSSELL, 2004), sendo assim, a ionosfera trabalha como essa “barreira” para o vento solar.

1.2 Objetivo

Tivemos como objetivos principais catalogar os anos restantes das fronteiras de plasma de Vênus usando dados da *Venus Express* (VEX) e utilizar este catálogo para identificar os intervalos de cruzamento da VEX pela bainha magnética, encontrando as principais frequências das ondas ULF com a transformada de wavelet.

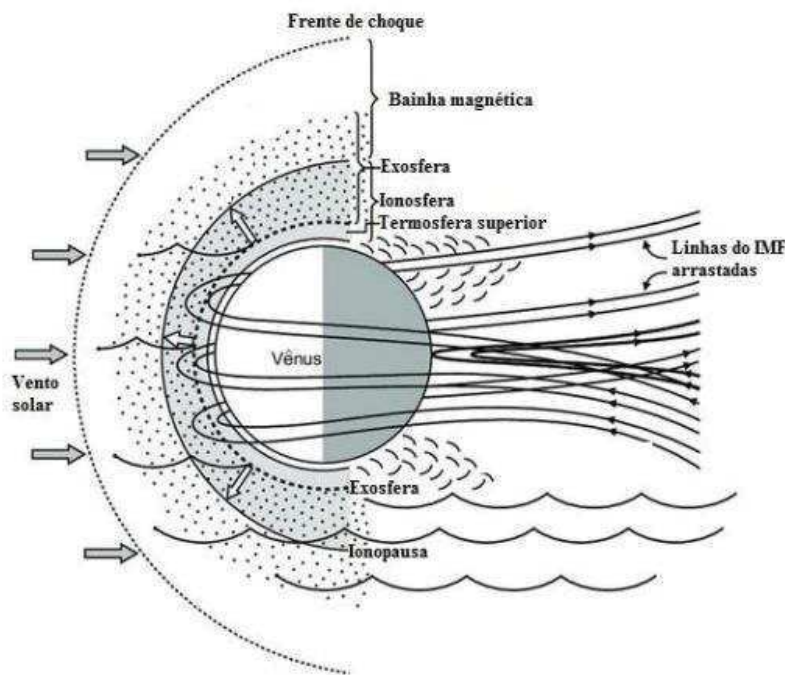
O trabalho a seguir apresenta cinco partes, sendo respectivamente 1) introdução, apresentação 2) os conceitos básicos das regiões de uma magnetosfera induzida, 3)

metodologia utilizada para a análise dos dados da espaçonave *Venus Express* (VEX), 4) os resultados e 5) a conclusão obtida com este trabalho.

2 MAGNETOSFERA INDUZIDA DE VÊNUS

Como citado, Vênus é um dos únicos planetas do nosso sistema solar que não possui um campo magnético próprio, portanto, a interação do vento solar com Vênus será propriamente feita com a sua ionosfera. O vento solar, como um plasma condutor, carrega consigo as linhas do campo magnético solar “congelados” (do inglês, *Interplanetary Magnetic Field*, IMF), que variam com o tempo ao encontrar uma ionosfera condutora. Como as linhas IMF não conseguem ultrapassar a ionosfera venusiana, estas são empilhadas no primeiro momento e defletidas ao redor do planeta. A A Figura 1 apresenta um exemplo desse empilhamento ao lado esquerdo (lado virado para o sol) e um arraste do vento solar ao lado contrário do sol (lado noturno).

Figura 1 – Ilustração da região especial da magnetosfera induzida de Vênus.



Fonte: Adaptado de Russell et al. (2007).

Durante essa interação, formam-se fronteiras e regiões de plasma em torno do planeta, sendo que cada região possui sua própria característica. Na Figura 1, são mostradas as principais regiões da magnetosfera induzida de Vênus. Temos a primeira fronteira de contato do vento solar-obstáculo, a frente choque, freando bruscamente o vento solar. Logo após, a região da bainha magnética (magnetobainha), na qual as ondas ULF estão presentes. Adiante, está a ionopausa, fronteira que separa o ambiente do vento solar com o ambiente planetário; uma cauda magnética induzida é formada pelo arraste das linhas do IMF em direção antissolar (KIVELSON e BAGENAL, 2007; ECHER, 2010). Os próximos subcapítulos são dedicados as principais regiões utilizadas nesse trabalho, a frente de choque, bainha magnética e ionopausa.

2.1 Frente de choque

A frente de choque (do inglês, *Bow Shock*, BS) é a primeira fronteira de contato do vento solar com o obstáculo planetário. Tem como principal função impedir a entrada do plasma solar, fazendo o vento solar frear bruscamente, assim, diminuindo sua velocidade de supermagnetosônica para submagnetosônica, além de forçar uma deflexão do plasma ao redor do planeta. Como ocorre uma diminuição brusca de velocidade, ocorre então uma conversão de energia cinética para energia térmica. Assim, além de ser dissipado ao redor do planeta, o vento solar é também superaquecido na próxima região.

A localização da frente choque é determinada pela natureza do planeta, tomamos como exemplo a Terra, como ela possui seu próprio campo magnético, a frente de choque forma-se mais distante do planeta em comparação a Vênus. Utilizando como números de comparação, a frente de choque terrestre está a uma distância de até $15 R_t$ (raio terrestre), enquanto a frente de choque venusiana está há menos de $5 R_v$ (raio de Vênus), lembrando que Vênus possui um tamanho semelhante a Terra (SCHWINGENSCHUH, RIEDLER, *et al.*, 1990).

2.2 Bainha Magnética

A bainha magnética (do inglês, *magnetosheath*) é a principal região para identificar as ondas ULF. Esta localiza-se entre a frente de choque e a MB de Vênus, caracterizada por um fluxo

altamente turbulento, instável e pela presença de ondas, devido ao vento solar sofrer uma compressão, desaceleração e deflexão e a alta densidade de prótons.

Por essa região apresentar uma variedade de tipos de ondas, dentro delas estão presentes as ondas frequências ultra-baixas (ULF), que é objeto de estudo deste trabalho. As ondas ULF foram observadas pela primeira vez em Vênus pela sonda Mariner-10, logo acima da frente de choque, conhecida como *foreshock*, sendo a região geradora de ondas devido as reflexões de partículas energizadas. Essas ondas se propagam para a região abaixo da frente de choque, a bainha magnética, podendo ser sustentadas devido à sua instabilidade, partículas energizadas que atravessaram a fronteira anterior devido a reflexão do vento solar e foram aceleradas na fronteira, ou por partículas que foram transportadas anteriormente e já se acoplaram ao plasma.

2.3 Fronteira de Acúmulo Magnético e Barreira Magnética

Nas magnetosferas induzidas, entre a bainha magnética e a Ionopausa encontra-se uma fronteira de acúmulo magnética (do inglês, *Magnetic Pile-Up Boundary*, MPB), determinada pelo seu campo magnético intenso e alinhado, devido ao empilhamento das linhas do IMF em torno do planeta e uma queda de fluxo eletrônico. Para Vênus, a região da MPB é equivalente ao limite superior da Barreira Magnética (NAGY, WINTERHALTER, *et al.*, 2004).

2.4 Fronteira Fotoelétrica ou Ionopausa

A fronteira fotoelétrica (do inglês, *Photoelectron Boundary*, PEB), como explicitado em sua própria nomenclatura, define a presença de elétrons gerados por fótons da radiação ultravioleta e do raio-X emitidos pelo Sol, conhecida também como Ionopausa. Esta região separa o plasma do vento solar do plasma planetário, impedindo que interajam diretamente com a ionosfera de Vênus.

3 INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA DE ANÁLISE

Para desenvolver este projeto, utilizamos dois equipamentos abordo da VEX, o ASPERA-4 (*Analyzer of Space Plasmas and Energetic Atoms*) e o MAG (*Magnetometer*). ASPERA-4 é

um equipamento utilizado detectar elétrons, íons e partículas neutras, possuindo quatro sensores, nos quais dois são destinados a átomos energéticos neutros, NPI (*Neutral Particle Imager*) e NPD (*Neutral Particle Detector*), e os demais são um espectrômetro de elétrons (do inglês, *Electron Spectrometer*, ELS) e um analisador de massa de íons do inglês, (*Ion Mass Analyzer*, IMA). O MAG é utilizado para medir a intensidade do campo magnético de Vênus, operando um sensor fluxgate *dual* com uma taxa amostral de até 128 Hz.

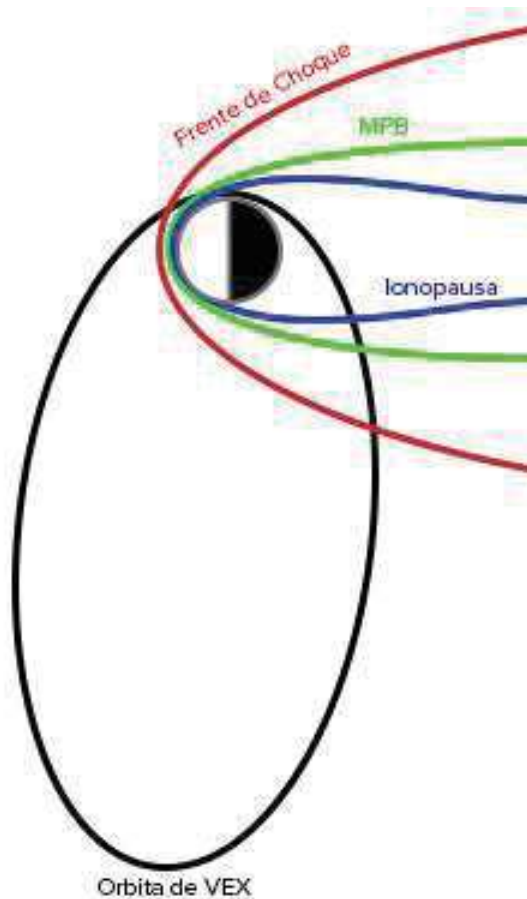
3.1 CCATI

A partir dos dados obtidos da densidade eletrônica da região da bainha magnética, conseguimos determinar as principais frequências de ondas ULF através da transformada wavelet. Contudo, para obter estas referências é necessário encontrarmos o intervalo de cruzamento da VEX por essa região. Para isso, analisamos os dados de plasma e campo magnético da VEX utilizando o software CCATI. Em cada cruzamento da VEX, podemos encontrar as três fronteiras citadas anteriormente (frente de choque, MPB e PEB). Na Figura 2, observa-se, em linhas pretas, a órbita da VEX e nota-se que ao longo dessa trajetória, a VEX passará pela magnetosfera e sucessivamente pelas três fronteiras. Respectivamente, a frente de choque em vermelho, a MPB em verde e a PEB em azul. As fronteiras são apresentadas através de representação numérica, sendo estas numeradas de 1 a 6:

1. Frente de choque (BS), entrada;
2. Barreira Magnética, entrada;
3. Fronteira fotoelétrica (Ionopausa), entrada;
4. Fronteira fotoelétrica (Ionopausa), saída;
5. Barreira Magnética (MPB), saída;
6. Frente de choque (BS), saída.

Nesta pesquisa, utilizamos os dados dentre os intervalos 1-2 e 5-6, pois nesses intervalos está presente a região da bainha magnética, a qual utilizamos para identificar as principais frequências de ondas ULF.

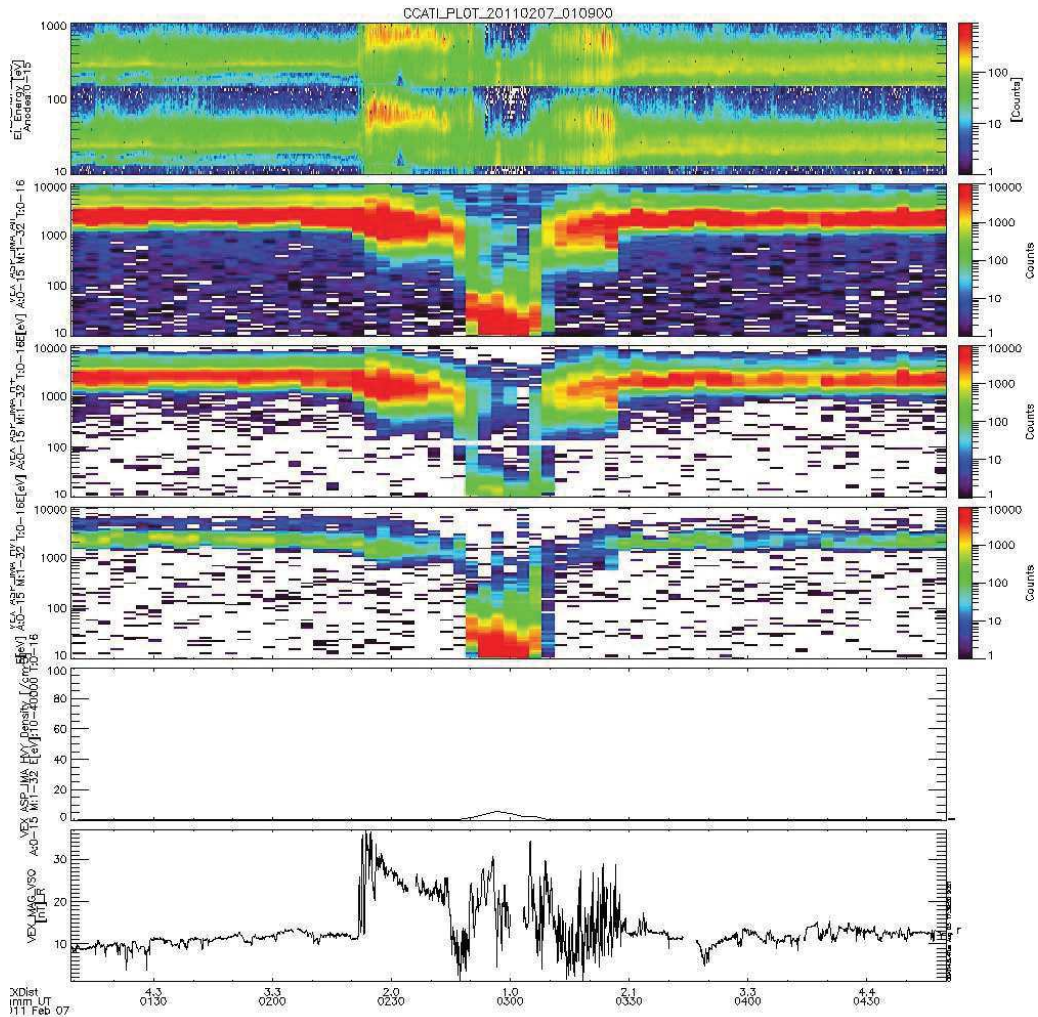
Figura 2 - Exemplo de uma órbita de cruzamento da VEX na magnetosfera venusiana.



Fonte: Baseado em (MARTINECZ, FRAENZ, *et al.*, 2008).

Na interface CCATI conseguimos determinar os intervalos de cruzamento da VEX e definir os dados dos equipamentos a bordo da VEX. Nesse trabalho, usamos apenas ASPERA-4 e MAG, plotamos o gráfico presente da Figura 3, e a partir desses plots, podemos encontrar as fronteiras cruzadas pelas VEX. No painel superior é mostrado o espectro de elétrons, no segundo painel o espectro de todos os íons da região, no terceiro é apresentado o espectro do H^+ (solar), no quarto o espectro de íon pesados (planetários), e no quinto painel é mostrado a densidade de íons pesados e no último painel a série temporal do campo magnético total.

Figura 3 - Gráfico dos dados do cruzamento do dia 07/02/2011 feito pela VEX.



3.2 Transformada de Wavelet (TW)

Após catalogar das fronteiras da magnetosfera, é possível então identificar as principais frequências de ondas ULF presentes na região da bainha magnética. Usamos a aplicação da transformada de wavelet, para analisar sinais não estacionários, com a função de wavelet de Morlet $\psi(t)$. As funções wavelet $\psi(t)$ são geradas a partir de uma função geradora simples, que sofrem expansões/contrações e translações no tempo, possuem um suporte compacto as quais são localizadas nos domínios de tempo (espaço) e escala, ao contrário do que acontece com as funções trigonométricas (BOLZAN, 2004). Como dito, essas ondas podem sofrer

expansão, por $\psi(t) \rightarrow \psi(2t)$, e translações, $\psi(t) \rightarrow \psi(t + 1)$, geradas a partir da função chamada, Ondeleta-mãe (BOLZAN e VIERIA, 2006):

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad (1)$$

Ao aplicar a transformada de wavelet (TW) na função o sinal é decomposto em frequência chamadas de ondeletas discretas, onde as funções são dilatadas para valores discretos, apresentando a transformada wavelet para uma função $f(t)$ na sua forma contínua.

$$TW_{(a,b)} = \int f(t) \psi_{a,b}(t) * dt, \quad (2)$$

Aqui, a representa a escala de dilatação /contração, e b se refere ao parâmetro de translação, $\psi_{a,b}(t)$ é a função wavelet-mãe, e $\psi_{a,b}(t) *$ representa seu complexo conjugado. A função de Morlet é descrita:

$$\psi_{j,k}(t) = e^{i\xi_0 t} e^{-\frac{t^2}{2}}, \quad (3)$$

Onde ξ_0 é uma frequência a-dimensional que controla o número de oscilações no pacote de onda

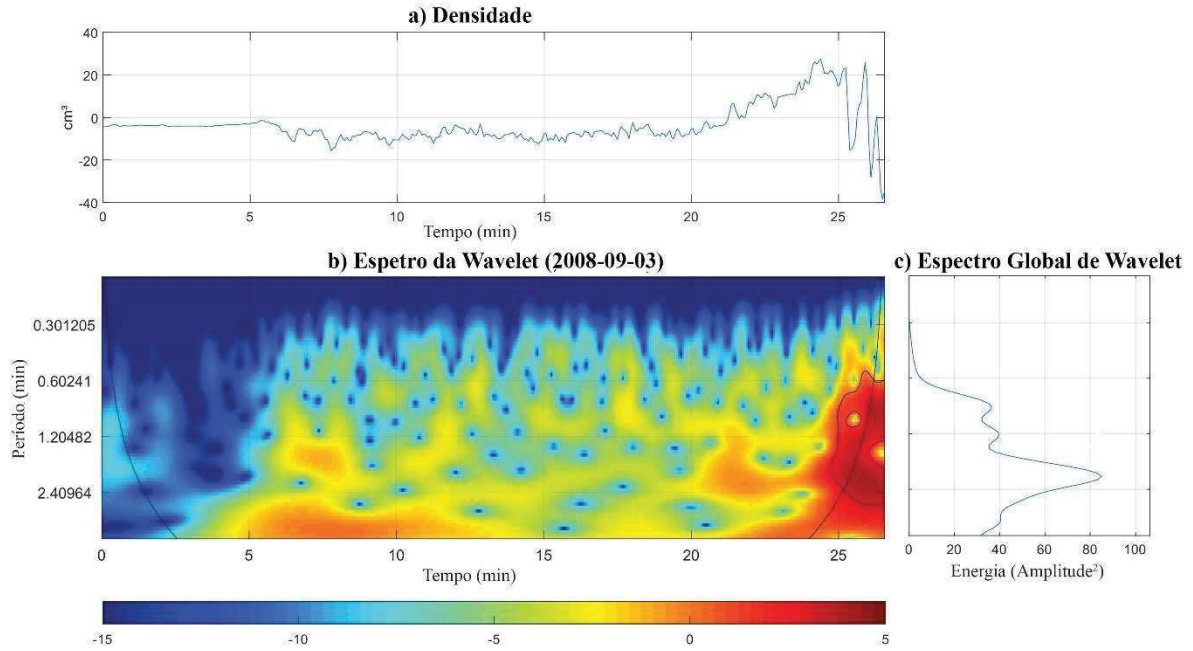
Com o Espectro Global de Ondeleta (do inglês, *Global Wavelet Spectrum*, GWS) conseguimos obter as frequências mais enérgicas no cruzamento pela região da bainha magnética de Vênus:

$$GWS = \int |TW(a,b)|^2 db. \quad (4)$$

Utilizamos a aplicação das transformada de wavelet nos dados de densidade de elétrons do ELS/ASPERA-4, dentro do intervalo da região magnética fornecido pela catalogação pelo CCATI. A Figura 4 é um gráfico gerado a partir dos dados do cruzamento da bainha magnética da VEX em 09 de março de 2008, sendo que a Figura 4- a) apresenta o espectro da densidade eletrônica, 4-b) o espectro wavelet e a 4-c) o espectro global da wavelet.

Observa-se na Figura 4-c), as amplitudes, esses picos, representam as principais frequências observada naquele cruzamento.

Figura 4 – Transformada de Wavelet nos dados de 09/03/2008. a) Densidade b) Espectro da Wavelet c) Espectro Global de Wavelet.



4 RESULTADOS

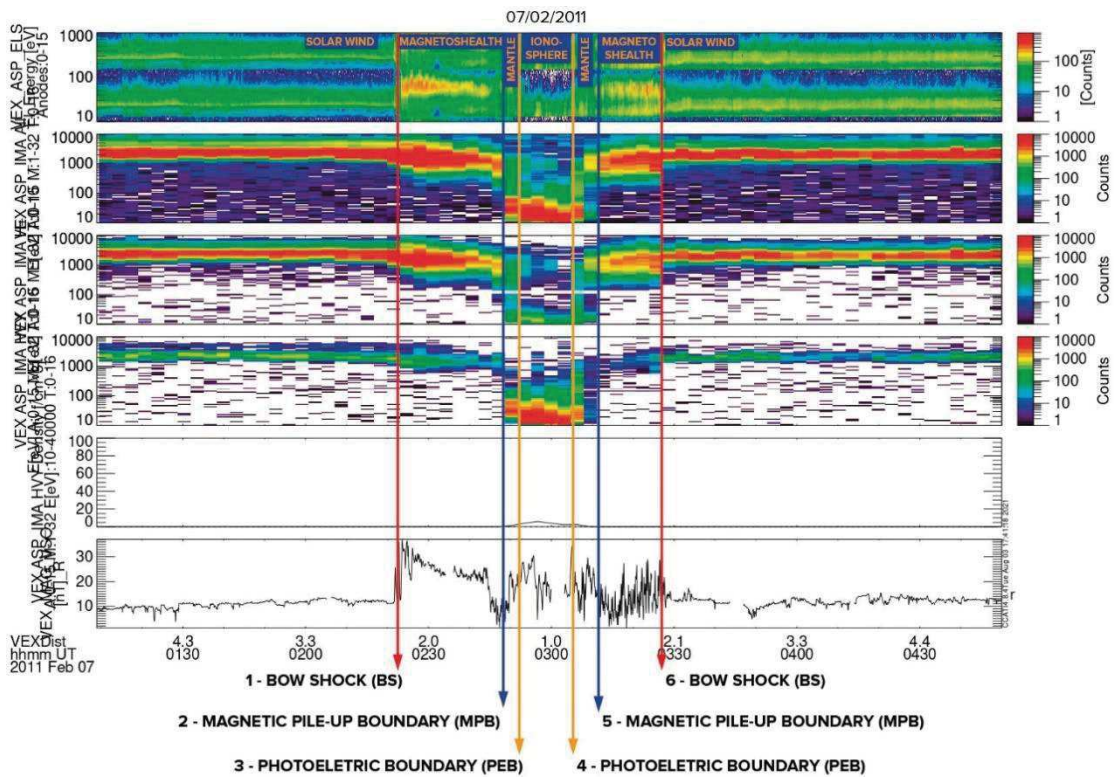
Apresentaremos neste capítulo os resultados obtidos pelo bolsista, de acordo com os objetivos do projeto: catalogar os anos restantes do cruzamento da VEX na magnetosfera de Vênus e identificar as principais frequências das ondas ULF na região da bainha magnética,

4.1 Identificação as fronteiras

Para identificarmos as fronteiras de cada cruzamento de VEX, utilizamos a interface de CCATI, assim, plotamos o gráfico com os devidos dados de cada cruzamento. Para identificar as regiões de cada fronteira utilizamos os critérios estabelecidos por MARTINECZ, *et al.*, (2008) e dados dentro do intervalo de $\leq 5 R_p$. De acordo com os critérios, as fronteiras são determinada da seguinte forma: a primeira fronteira, frente de choque (BS) é localizada por um súbito aumento de elétrons e íons, devido à compressão

do plasma e aumento repentino no campo magnético; a fronteira da MPB (limite superior da Barreira Magnética) é localizada por uma diminuição na densidade de elétrons e íons e o aumento da intensidade do campo magnético. A fronteira da ionopausa (PEB) é identificada quando o fluxo de elétrons e íons é muito baixo, e nota-se a presença de elétrons entre 2020 e 3030 eV no espectro de elétrons. Todas essas fronteiras são identificadas visualmente e marcadas manualmente usando o cursor do mouse. Na Figura 3 observa-se o gráfico gerado pelo CCATI e nota-se a presença de todas as fronteiras de acordo com o critério citado, para facilitar visualização das fronteiras, linhas coloridas e nomeadas foram acrescentadas na Figura 5 (mesmo dados utilizados na Figura 3 para afim de comparação). Como as fronteiras foram catalogadas até 2012, o bolsista então catalogou os anos de 2011 e 2012.

Figura 5 – Gráfico gerado pelo CCATI com dados de 7 de fevereiro de 2011 e linhas com representação de cada fronteira.

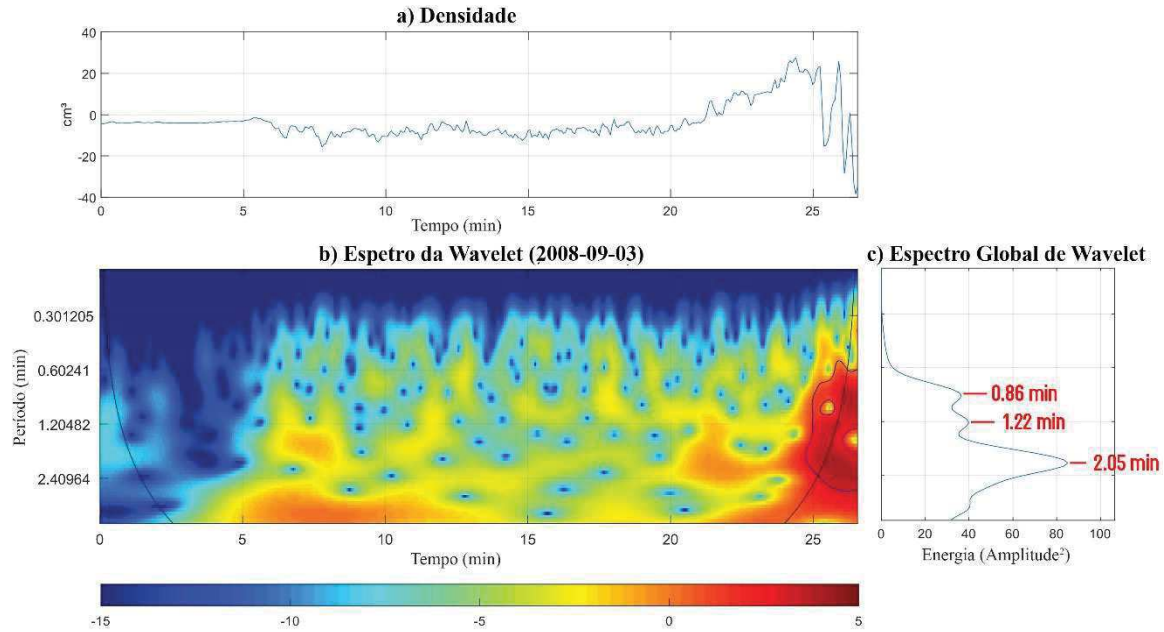


Vale salientar que esse catálogo é de suma importância, pois encontramos intervalos de dados da região da bainha magnética onde localiza-se a principal fonte de presença das ondas ULF, permitindo assim, a sua análise. Além disso, o catálogo também fornece dados de outras regiões, o que possibilita futuras análises em diferentes ambientes de plasma de Vênus.

4.2 Identificação das principais frequências de ondas ULF

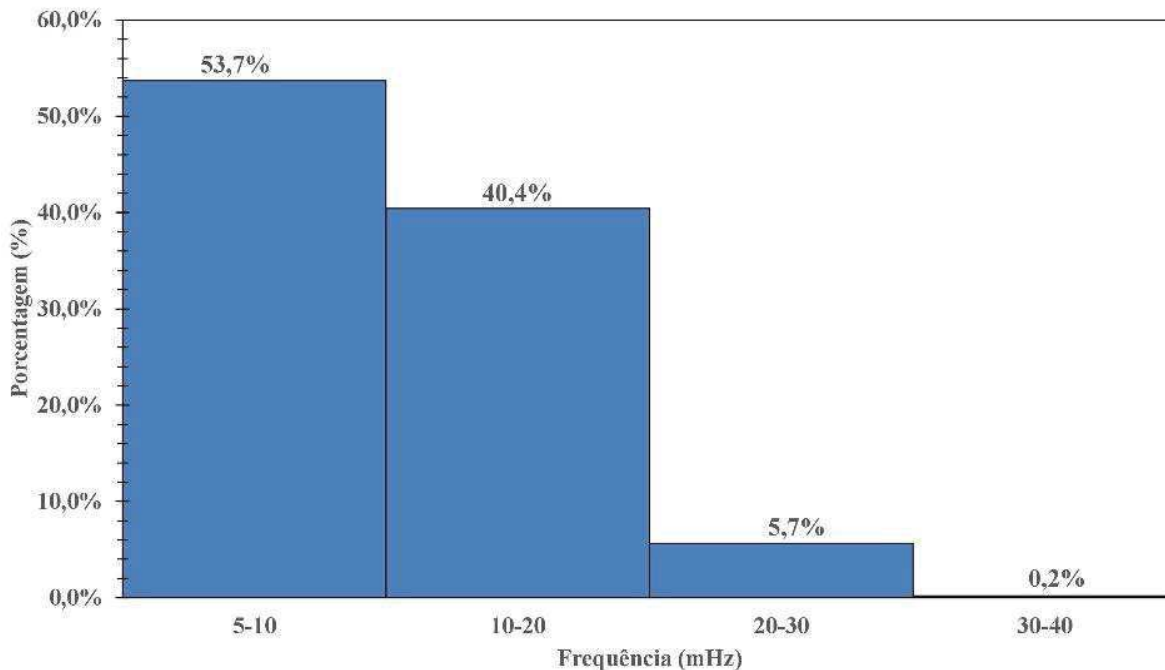
Aplicando a transformada de wavelet na região da bainha magnética, obtivemos as frequências mais energéticas de ondas ULF na região da bainha magnética de Vênus. Aplicamos a TW nos dados de densidade de elétrons do ELS/ASPERA-4 para os anos entre 2006 a 2008, obtendo um total de 330 cruzamentos da VEX pela bainha magnética, sendo identificados 512 frequências correspondentes aos picos de maior potência espectral wavelet. A Figura 6 exemplifica a aplicação da TW com suas respectivas frequências encontradas no painel c) no dia 09 de março de 2008. Nesse cruzamento pela bainha magnética, as principais frequências encontradas foram 20 mHz (0,86min), 14 mHz (1,22min) e 8mHz (2,06min). Após aplicar TW em 330 cruzamentos, fizemos a análise estatística usando as 512 frequências encontradas.

Figura 6 – Gráfico transformada de Wavelet nos dados de 09/07/2008 com os principais períodos encontrados. a) Densidade b) Espectro da Wavelet c) Espectro Global de Wavelet.



Com a análise estatística, obtivemos o seguinte histograma na Figura 7. Com isso, concluímos que de acordo com os dados da VEX, os principais intervalos de frequências mais energéticas na região da bainha magnética de Vênus dos anos de 2006 a 2008 foram entre 5-20 mHz, dentre 5-10 mHz com 53,7% e 10-20 mHz com 40,4% dos 512 períodos analisados. Observa-se que frequências menores que 5 mHz não foram analisadas, pois a própria VEX, com seu movimento, pode ter gerado sinais falsos que poderiam ser interpretados como ondas ULF, sendo assim, descartados.

Figura 7 -Histograma com os intervalos de principais frequências encontradas na região da bainha magnética de Vênus nos anos de 2006 a 2008.



5 CONCLUSÃO

Durante o período da Bolsa de Iniciação Científica, o bolsista desenvolveu conceitos sobre a formação das magnetosferas e compreendeu o uso das ferramentas de análises de séries temporais como a transformada de wavelet. O bolsista cumpriu com os objetivos de catalogar os cruzamentos *da Venus Express*, aplicar a transformada de wavelet e analisar as principais ondas ULF nos de 2006 a 2008.

Os dados obtidos com esta pesquisa se mostraram satisfatórios e acrescentaram à compreensão da magnetosfera de Vênus. Apesar de Vênus estar mais perto do Sol, ter uma atmosfera mais densa e ser maior que Marte e, diferente do que ocorre em Marte, o ciclo solar tem influência na localização dos limites do plasma (MARTINECZ, FRAENZ, *et al.*, 2008; CHAI, WAN, *et al.*, 2015; XIAO, ZHANG e WANG, 2017) observamos através dos resultados uma similaridade aos resultados obtidos para bainha magnética de Marte, onde esses mesmos intervalos de frequências foram vistos como os de frequências mais energéticas (FRANCO, FRAENZ, *et al.*, 2019).

REFÊNCIAS

BOLZAN, M. J. A. Analysis of Wavelet Transform applied in Geophysical. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 26, p. 37-41, 2004.

BOLZAN, M. J. A.; VIERIA, P. C. Wavelet analysis of the wind velocity and temperature variability in the Amazon Forest. **Brazilian Journal of Physics**, v. 36, p. 1217-1222, 2006.

CHAI, et al. SZA-dependent asymmetries in Venusian bow shock location revealed by Venus Express. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, v. 120, p. 4446-4451, 2015.

ECHER, E. Magnetosferas planetárias. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, p. 230, 2010.

FRANCO, A. M. S. et al. Wavelet analysis of low frequency plasma oscillations in the magnetosheath of Mars. **Advances in Space Research**, v. 65, p. 2090-2098, 2019.

GOLD, T. Plasma and magnetic fields in the solar system. **Journal of Geophysical Research**, v. 64, p. 1665– 1674, Novembro 1959.

KIVELSON, M. G.; BAGENAL, F. Planetary Magnetospheres. **Encyclopedia of the Solar System (Second Edition)**, p. 519-539, 2007.

LUHMANN, J. G.; LEDVINA, S. A.; RUSSELL, C. T. Induced magnetospheres. **Advances in Space Research**, v. 33, p. 1905-1912, 2004.

MARTINECZ, C. et al. Location of the bow shock and ion composition boundaries at Venus-initial determinations from Venus express Aspera-4. **Planetary and Space Science**, v. 56, p. 780-784, 2008.

NAGY, A. F. et al. The plasma environment of Mars. **Space Science Reviews**, v. 111, p. 33-114, 2004.

PODGORNY, I. M.; DUBININ, E. M.; ISRAELEVICH, P. L. Laboratory simulation of the induced magnetospheres of comets and Venus. **The Moon and the Planets**, v. 23, p. 323-338, 1980.

SCHWINGENSCHUH, K. et al. Martian bow shock: Phobos observations. **Geophysical Research Letters**, v. 17, p. 889-892, 1990.

XIAO, S. D.; ZHANG, T. L.; WANG, G. Q. Statistical study of low-frequency magnetic field fluctuations near Venus during the solar cycle. **Journal of Geophysical Research**, v. 122, p. 8409-8418, 2017.