



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

2020



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

2020

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 afim de terminar o projeto.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO E OBJETIVO.....	1
1.1	INTRODUÇÃO.....	1
1.2	OBJETIVO.....	2
2	MAGNETOSFERA INDUZIDA DE VÊNUS.....	2
2.1	FRENTE DE CHOQUE.....	3
2.2	BAINHA MAGNÉTICA.....	4
2.3	FRONTEIRA DE ACÚMULO MAGNÉTICO.....	4
2.4	BARREIRA MAGNÉTICA.....	5
2.5	FRONTEIRA FOTOELÉTRICA OU IONOPAUSA.....	5
2.6	CAUDA MAGNÉTICA INDUZIDA.....	5
3	INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA DE ANÁLISE.....	5
3.1	CCATI SOFTWARE.....	7
3.2	TRANSFORMADA DE WAVELET.....	9
4	RESULTADOS E ANÁLISES.....	11
4.1	IDENTIFICAÇÃO AS FRONTEIRAS.....	11
4.2	ANÁLISE DA TRANSFORMADA DE WAVELET.....	13
5	CONCLUSÃO E FUTUROS TRABALHOS.....	15
6	REFERÊNCIAS.....	17

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1: Interação do vento solar com Vênus e regiões da magnetosfera</i>	<i>3</i>
<i>Figura 2: Interface do CCATI.</i>	<i>7</i>
<i>Figura 3 Painel para definir os dados no CCATI.</i>	<i>8</i>
<i>Figura 4: Gráfico gerado no CCATI com dados da VEX.....</i>	<i>8</i>
<i>Figura 5: Transformada de Wavelet a) Densidade b) Espectro da Wavelet c) Espectro Global de Wavelet.....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 6: Gráfico gerado no CCATI com dados da VEX.....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 7: Gráfico gerado no CCATI sem as fronteiras PEB e a saída da frente de choque.</i>	<i>13</i>
<i>Figura 8: Gráfico gerado no MatLab a) Densidade eletrônica. b) Espectro de Wavelet. c) GWS.</i>	<i>14</i>
<i>Figura 9: Histograma da porcentagem com as principais frequência encontradas no GWS de 2006 a 2008 cruzadas na magnetosfera de Vênus.</i>	<i>15</i>

RESUMO

A presença de ondas de frequência ultra-baixa (do inglês, *ultra-low frequency*, ULF) foi observada pela primeira vez na magnetosfera induzida de Vênus pela sonda Mariner-10. Estas ondas ULF também foram observadas em diversas regiões do ambiente espacial de Vênus por outras sondas espaciais. Acredita-se que as ondas ULF sejam geradas na região acima da frente de choque planetário por íons e elétrons energizados, refletidos na fronteira e transportados para regiões abaixo da frente de choque com o fluxo turbulento da magnetobainha. Essas ondas ULF são intensificadas na região da bainha magnética, onde existem várias fontes que geram essas ondas, dentre elas íons planetários que interagem com o plasma dessa região. Para identificar as principais frequências das ondas ULF na bainha magnética de Vênus, as fronteiras de plasma da magnetosfera venusiana foram catalogadas usando dados de campo magnético e de plasma fornecidos pelos instrumentos MAG (*Magnetometer*) e ASPERA-4 (*Analyzer of Space Plasmas and Energetic Atoms*), respectivamente, da missão *Venus Express* (VEX). A identificação foi feita usando o software CCATI, que permite selecionar o instante em que a sonda espacial VEX cruza cada fronteira da magnetosfera, incluindo a frente de choque e a região de acúmulo magnético (MPB), que correspondem aos limites da bainha magnética. Um catálogo de fronteiras de plasma está sendo atualizado, compilado para o período completo da missão VEX (2006-2014). Então, com este catálogo, o intervalo de bainha magnética é selecionado e a transformada Wavelet é aplicada nos dados de densidade de elétrons (ELS / ASPERA-4) para identificar as principais frequências das ondas ULF na bainha magnética de Vênus.

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVO

1.1 Introdução

Existe uma grande variedade de estudos do campo magnético da Terra realizada no último século (CHAPMAN e BARTELS, 1940; KIVELSON e T., 1995), propiciando a aquisição de um grande conhecimento da sua magnetosfera. Desta forma, surgiu um interesse de estudar as magnetosferas de outros planetas do sistema solar. A magnetosfera se forma pela interação de algum obstáculo do meio interplanetário (como planetas, cometas, luas, etc.) com o vento solar, o qual é uma emissão de partículas carregadas, composto principalmente por íons de hidrogênio e elétrons. O vento solar é ejetado da coroa solar viajando em uma velocidade supersônica pelo meio interplanetário, e que transposta consigo linhas de campo magnético do Sol (do inglês, *Interplanetary Magnetic Field*, IMF) (PARKER, 1965; ECHER, 2010). Com essa interação notou-se dois tipos de magnetosfera, a intrínseca e induzida (GOLD, 1959; PODGORNÝ, DUBININ e ISRAELEVICH, 1980; KIVELSON e BAGENAL, 2007; ECHER, 2010).

Magnetosferas intrínsecas são formadas em planetas magnetizados, como a Terra, onde existe um campo magnético com intensidade suficiente para defletir o vento solar. Magnetosferas induzidas são observadas nos planetas Vênus e Marte e, surgem a partir da interação entre o vento solar e a ionosfera/superfície condutora de planetas não magnetizados (PODGORNÝ, DUBININ e ISRAELEVICH, 1980; LUHMANN, LEDVINA e RUSSELL, 2004).

Este relatório apresentará análises de dados da magnetosfera induzida de Vênus fornecida por instrumentos a bordo da espaçonave *Venus Express* (VEX), operada pela agência espacial europeia (ESA), que tinha com objetivo de estudar a atmosfera e ambiente espacial próximo de Vênus.

1.2 Objetivo

Sendo assim, este trabalho tem por objetivo geral catalogar as fronteiras de plasmas de Vênus e identificar as principais frequências das ondas ULF na bainha magnética de Vênus a partir da aplicação da transformada por wavelet nos dados de densidade eletrônica medidos pela VEX.

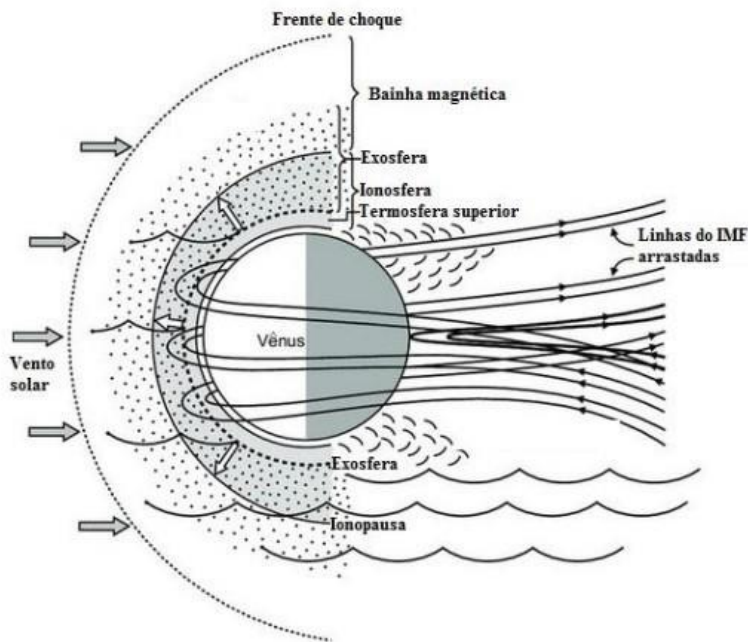
2 MAGNETOSFERA INDUZIDA DE VÊNUS

Vênus possui uma magnetosfera induzida formada pela interação do vento solar com a ionosfera do planeta. Esta interação gera regiões com diferenças características em diferentes altitudes. O vento solar é um plasma altamente condutor e, portanto, transporta pelo meio interplanetário as linhas de campo magnético solar “congeladas” nele (KIVELSON e BAGENAL, 2007; ECHER, 2010). A interação deste plasma magnetizado com Vênus acontece via a parte superior da ionosfera venusiana, que por si já está ionizada por radiações ultra violeta e raios X solares (LUHMANN, RUSSELL, *et al.*; (SHAN, LU, *et al.*, 2015; (RAMSTAD, BARABASH, *et al.*, 2017). Como o IMF não consegue penetrar através da ionosfera, surge uma força que deflete o fluxo do vento solar, empilhando-o ao redor de Vênus. Como a ionosfera de Vênus é condutora, o IMF induz correntes na mesma, que por sua vez gera forças que fazem com que o IMF empilhe acima da ionosfera e o fluxo do vento solar seja defletido ao redor do planeta.

Essa extensão de campo empilhado gera uma região semelhante a uma magnetosfera criada por um campo magnético intrínseco, formando a magnetosfera induzida (CLOUTIER e DANIELL JR, 1973; CLOUTIER, TASCIONE e DANIELL JR, 1981; LUHMANN, LEDVINA e RUSSELL, 2004; KIVELSON e BAGENAL, 2007; ECHER, 2010; DIÉVAL, KALLIO, *et al.*, 2012).

A Figura 1 apresenta as regiões e fronteiras de plasma da magnetosfera de Vênus, as quais serão brevemente apresentadas nas subseções seguintes.

Figura 1: Interação do vento solar com Vênus e regiões da magnetosfera



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

2.1 Frente de choque

Como anteriormente mencionado, a frente de choque (do inglês, *Bow Shock*, BS) é a primeira região da magnetosfera, formada a partir da interação do vento solar com o obstáculo planetário. Com isso, o vento solar sofre uma desaceleração que altera sua velocidade de supermagnetosônica para submagnetosônica, convertendo parte de sua energética cinética em energia térmica desacelerando e aquecendo o fluxo do vento solar. Como resultado, uma onda de choque se forma à frente das cavidades magnetosféricas (LECKBAND, BURGESS, *et al.*, 1995) (MAZELLE, WINTERHALTER, *et al.*, 2004).

A localização da frente de choque depende das características de cada planeta. Como exemplo, no planeta Terra, que possui campo magnético intrínseco, a frente de choque vai se formar mais distante do planeta. Isso, também é válido para planetas com campo magnético maior, assim formando uma frente de choque mais distante, sendo diferente de

magnetosferas induzidas que se formam mais próxima dos mesmos. A posição da frente de choque também depende do raio planetário, quanto maior o raio mais distante a sua frente de choque (SCHWINGENSCHUH, RIEDLER, *et al.*, 1990).

2.2 Bainha Magnética

A região da bainha magnética é localizada entre a frente de choque e a fronteira de acúmulo magnético (do inglês *Magnetic pile-up Boundary*, MPB), tornando-se característica após o vento solar sofrer uma compressão, desaceleração e deflexão gerando a alta temperatura devida à transformação de energia e a alta densidade de prótons (LUHMANN, RUSSELL, *et al.*, 1992; ECHER, 2010).

Essa região tem uma grande importância para este trabalho, por apresentar grande variedade de ondas, como as ondas de baixa frequência (do inglês, Low Frequency, LF) e ondas de frequência ultra-baixa (do inglês, Ultra-Low Frequency, ULF). Essas ondas foram observadas no ambiente espacial de Vênus pelas primeiras pela espaçonave Mariner-10 (GREENSTADT, OLSON, *et al.*, 1979; LEPPING e BEHANNON, 1980). Essas ondas são geradas na região “acima” da frente choque, chamada de foreschock, por partículas energizadas ou refletidas, possuindo energia suficiente para ser encontradas na bainha magnética. Nessa região, ondas ULF podem se tornar mais intensas devido às fontes que podem intensificar a partir das instabilidades locais, partículas refletidas contra o vento solar e aceleradas nas fronteiras e por partículas já presentes na magnetobainha que atravessam a frente de choque e se unem com o plasma. Essas ondas apresentam frequências na bainha da magnetosfera entre 1-100 mHz.(DUBININ e FRAENZ, 2016; FRÄNZ, ECHER, *et al.*, 2017).

2.3 Fronteira de acúmulo magnético

Abaixo da bainha magnética, especificamente no limite superior da barreira magnética encontra-se uma fronteira de acúmulo magnético (do inglês, *Magnetic pile-up boundary*, MPB), caracterizada por um aumento na intensidade do campo magnético e um decréscimo no fluxo de elétrons (DUBININ, FRÄNZ, *et al.*, 2007).

2.4 Barreira Magnética

A barreira magnética, também é conhecida como região de acúmulo magnético (do inglês, *Magnetic Pile-up Region*, MPR), é uma região em que a pressão magnética domina as demais contribuições da pressão restantes, além do campo magnético ser altamente forte e organizado, resultando no arraste e empilhamento das linhas IMF (NAGY, WINTERHALTER, *et al.*, 2004).

2.5 Fronteira Fotoelétrica ou Ionopausa

A ionopausa é uma fronteira que separa o plasma planetário do plasma do vento solar, o qual interage diretamente com a ionosfera do planeta (ECHER, 2010), sendo determinada pelo balanço entre a pressão ionosférica pela pressão externa do vento solar (KIVELSON e BAGENAL, 2007). Essa região também é conhecida como fronteira fotoelétrica (do inglês, *Photoelectron Boundary*, PEB). Como descrito na seção anterior, a ionosfera é ionizada por radiação ultravioleta e raios-x de origem solar, assim, gerando fotoelétrons através dos fótons das radiações solares (MITCHELL, LIN, *et al.*, 2001; BRAIN, 2006; MA, ALTWEGG, *et al.*; DIÉVAL, KALLIO, *et al.*, 2012).

2.6 Cauda Magnética Induzida

A magnetocauda induzida é formada pelo arraste das linhas do campo magnético empilhadas na barreira magnética pelo vento solar na direção noturna do planeta. Devido a esta extensão das linhas do IMF em torno do corpo, uma lâmina de plasma no centro da cauda é formada, esta que divide a magnetocauda em dois lóbulos, norte e sul, que apresentam sentidos de linhas de campo contrários e variáveis com a orientação do IMF (VAISBERG e ZELENY, 1984; DAS, 1998).

3 INSTRUMENTAÇÃO E METODOLOGIA DE ANÁLISE

Para identificar as principais frequências das ondas ULF na bainha magnética de Vênus, foram utilizados dados de campo magnético e de plasma fornecidos pelos instrumentos MAG (*Magnetometer*) e ASPERA-4 (*Analyzer of Space Plasmas and Energetic Atoms*), MAG (*Magnetometer*), abordo da missão *Venus Express* (VEX). O Magnetômetro, é um

sensor fluxgate dual com uma taxa amostral de até 128 Hz, derivando medidas da intensidade e direção do campo magnético (ZHANG, 2007).

O ASPERA-4 é um instrumento utilizado para detectar íons, elétrons e partículas neutras, que possui 4 sensores, 2 deles para estudar átomos energéticos neutros, NPI (*Neutral Particle Imager*) e NPD (*Neutral Particle Detector*), um espectrômetro de elétrons (do inglês, *Electron Spectrometer*, ELS) e um analisador de massa de íons do inglês, (*Mass resolving Ion Analyser*, IMA). Os dados dos sensores de ELS e do IMA que são usados para plotagem dos gráficos para identificação de fronteiras e apenas o ELS para transformadas de wavalet (BARABASH, 2007).

Com os dados da densidade de elétrons e de íons podemos identificar as frequências de ondas ULF através da transformada de wavelet com o software MatLab. No entanto para saber qual região aplicar a transformada de wavelet é necessário delimitar as fronteiras da magnetosfera venusiana em cada cruzamento da VEX durante o intervalo de sua missão de 2006 a 2014, para encontrar a região da bainha magnética, a qual estamos interessados para desenvolver este estudo. Foi utilizada uma lista dos cruzamentos das fronteiras de plasma provida por Martineczs et al. (2008), esta lista fornece o instante em que a VEX cruzou de cada fronteira de plasma de 2006 a 2010. As fronteiras são apresentadas através de representação numérica, sendo estas numeradas de 1 a 6:

- 1- Frente de choque (entrada);
- 2- Barreira Magnética (entrada);
- 3- Fronteira fotoelétrica (entrada);
- 4- Fronteira fotoelétrica (saída);
- 5- Barreira Magnética (saída);
- 6- Frente de choque (saída).

Sendo relevante para esse trabalho, apenas as fronteiras entre 1-2 e 5-6 representam a região da bainha magnética. Como a lista de Martineczs não cobre todo intervalo da missão, faltando os 4 últimos anos, o bolsista ficou encarregado de analisar e catalogar os anos restantes.

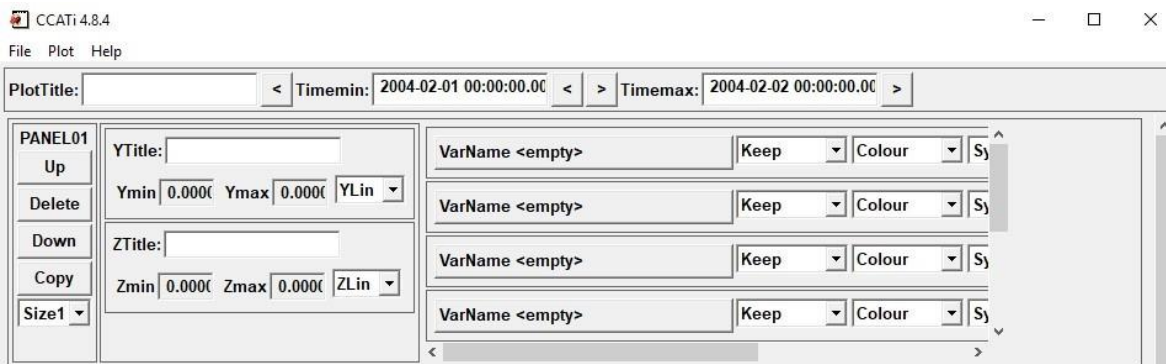
3.1 CCATI Software

O próximo passo do estudo é atualizar e catalogar o tempo de cruzamento da VEX em cada fronteira e para isso utiliza-se o CCATI.

CCATI é um software escrito em IDL, desenvolvido por Markus Fraenz et al., que geram gráficos de serie temporais, o programa passou por uma adaptação do software Emmanuel Penous CLL3 para analisar os dados de VEX/ASPERA-4 (FRAENZ, MOUIKIS, *et al.*, 2016).

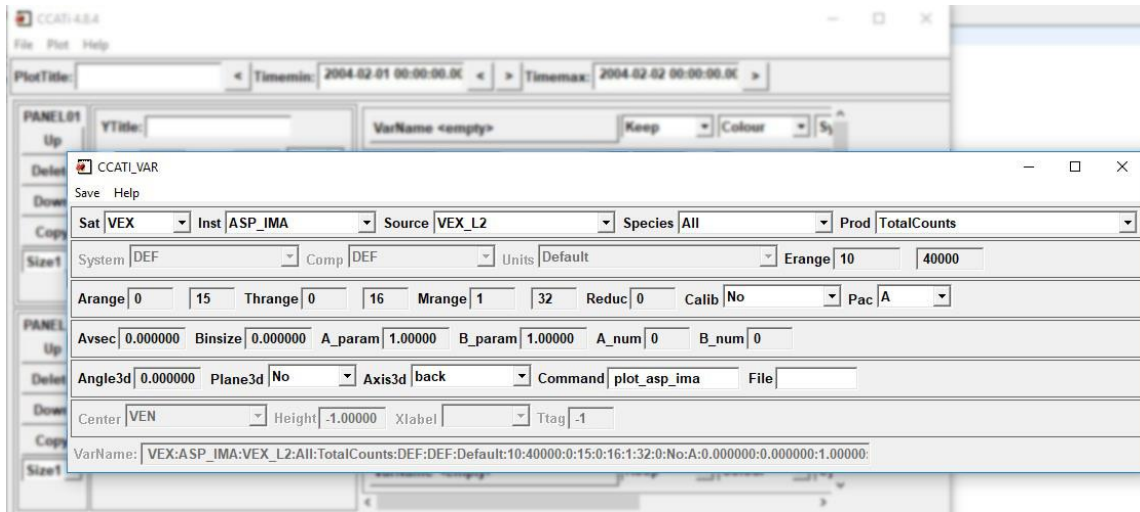
Na Figura 2 é um exemplo da interface do CCATI. Com o CCATI usamos critérios de órbita da espaçonave para determinar intervalos em que a espaçonave VEX se encontrava a até 5 Raio Venusianos do planeta. Posteriormente, um layout foi criado, este que nos fornece plots de painéis com espectro de elétrons, íons e série temporal do campo magnético. Feito isto, conseguimos determinar o intervalo de cada fronteira citado anteriormente através de critérios de identificação de fronteiras que serão apresentados posteriormente na seção de resultados.

Figura 2: Interface do CCATI.



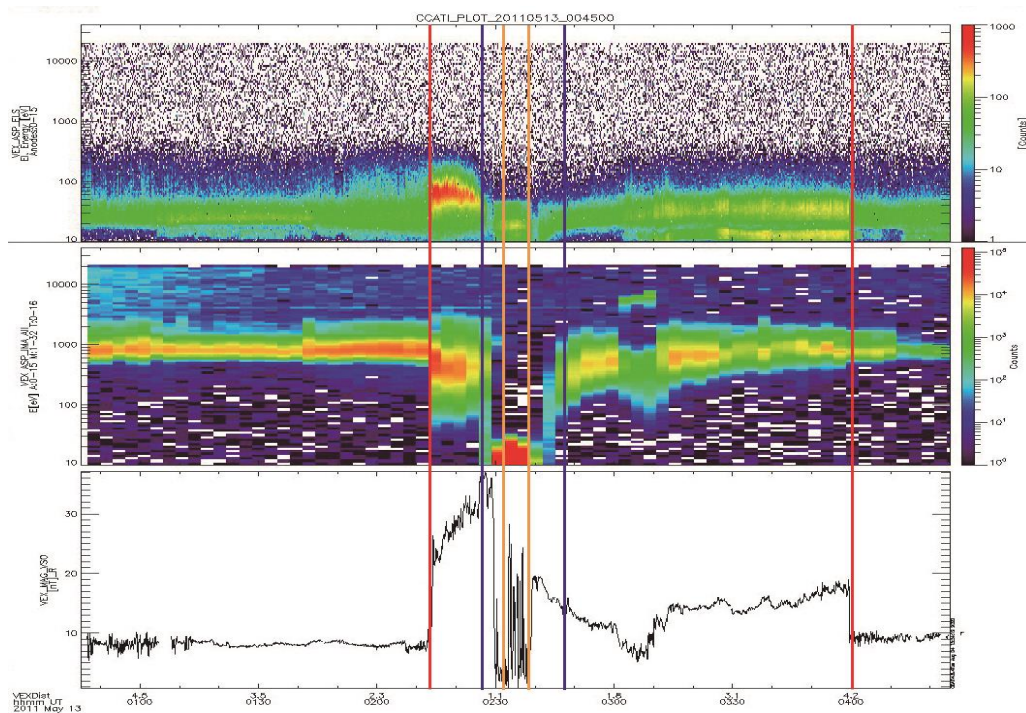
Na própria interface do CCATI conseguimos alterar/definir a data de cruzamento do espaçonave, nesse caso catalogamos as fronteiras do ano de 2011. Ajustamos para plotar apenas os dados de densidade do elétron, íons e campo magnético. Na Figura 3 é um exemplo das configurações do CCATI para plotagem.

Figura 3 Painel para definir os dados no CCATI.



Na Figura 4 mostra-se um exemplo do gráfico plotado, entre 13 de Maio de 2011 e 14 de Maio de 2011. No painel superior é mostrado o espectro de elétrons, no painel intermediário, espectro de íons e no último painel, a série temporal do campo magnético total. As fronteiras identificadas são apresentadas na figura pelas linhas verticais.

Figura 4: Gráfico gerado no CCATI com dados da VEX.



3.2 Transformada de Wavelet

A técnica utilizada para a identificação das frequências na bainha magnética de Vênus será a Transformada Wavelet. As funções Wavelet de Morlet $\psi(t)$, são funções matemáticas de suporte compacto, as quais são localizadas nos domínios de tempo (espaço) e escala, ao contrário do que acontece com as funções trigonométricas (BOLZAM, 2004). Esta função wavelet pode ser descrita pela Equação 1 (BOLZAM e VIERIA, 2006):

$$\psi(t) = e^{i\xi_0 t} e^{-\frac{t^2}{2}}$$

Equação 1

Onde ξ_0 é uma frequência adimensional que controla o número de oscilações no pacote de onda.

A Equação 2 apresenta a transformada wavelet (TW) para uma função $f(t)$ na sua forma contínua.

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

Equação 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 identificação dos períodos/frequências mais energéticos presentes nos dados de densidade de elétrons na bainha magnética de Vênus será realizada usando o espectro wavelet global (do inglês, *Global Wavelet Spectrum, GWS*), este que é identificado pela Equação 3.

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

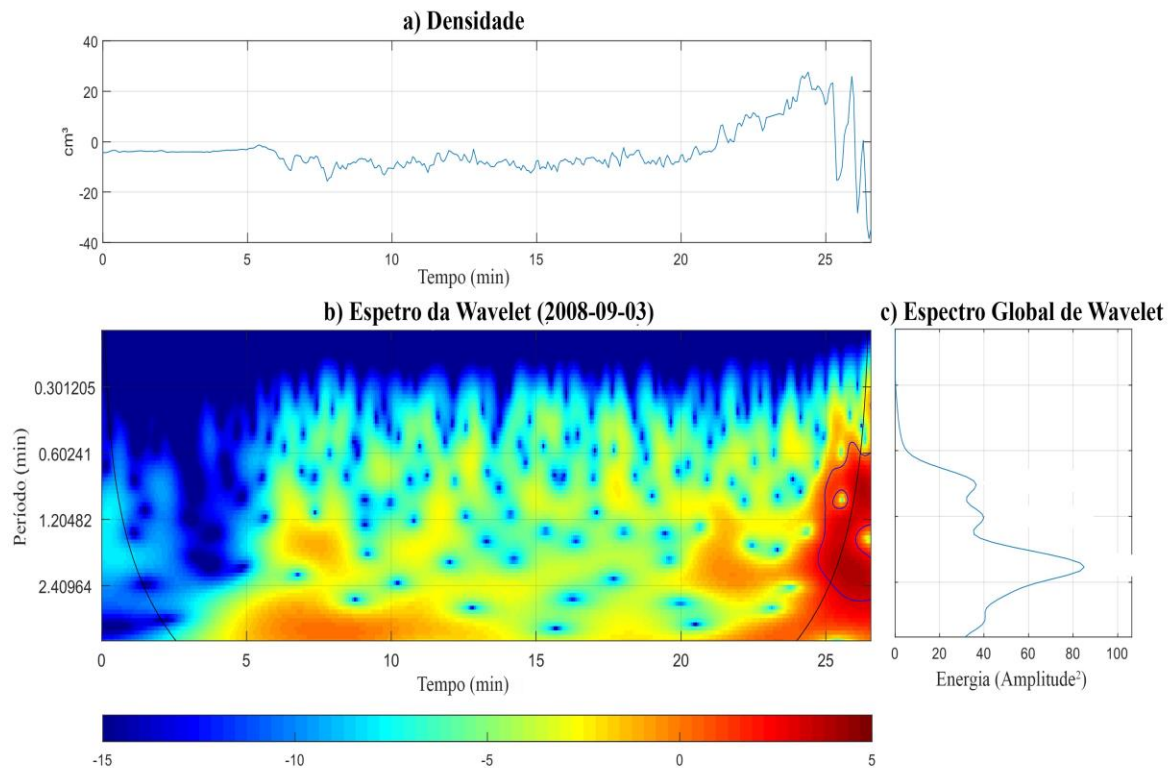
Equação 3

Para o desenvolvimento do trabalho, analisamos dados da ASPERA-4/VEX dos anos de 2006 e 2008. Foram utilizados dados dos intervalos de cruzamentos da VEX na bainha

magnética. Com o software MatLab geramos gráficos de transformada de Wavelet, assim, conseguimos identificar as principais frequências encontrada na densidade de elétrons na magnetobainha de Vênus.

Na Figura 5 é apresentado um exemplo dessa aplicação da transformada de wavelet, no período que VEX cruzou a magnetosfera entre 06:05 UT e 6:31 UT em 09 de setembro de 2008, Figura 5-a) São dados da densidade eletrônica do intervalo do cruzamento da VEX, Figura 5-b) Observa-se o espectro da transformada de wavelet a partir do qual se obtém todas frequências presentes naquele cruzamento e na Figura 5-c) É um gráfico que consta as principais frequências, cada amplitude representa o período principal obtido naquele intervalo da magnetobainha, na seção de resultados serão apresentadas as principais frequências.

Figura 5: Transformada de Wavelet a) Densidade b) Espectro da Wavelet c) Espectro Global de Wavelet.



4 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo os resultados das análises realizadas pelo bolsista a partir dos dados mencionado no capítulo anterior são apresentados.

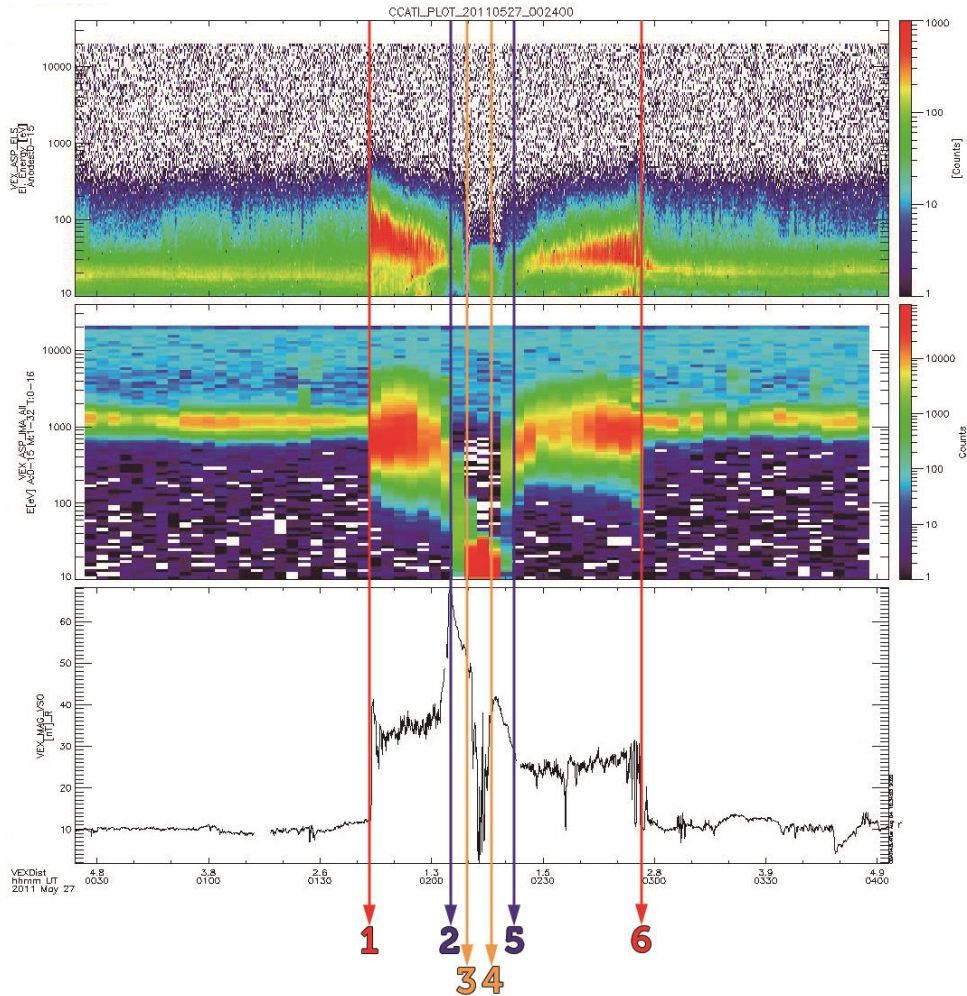
4.1 Identificação as fronteiras

Conforme descrito na seção 3, para identificação das principais frequências de ondas ULF é necessário saber a localização dos limites das fronteiras através dos cruzamentos da VEX, principalmente os limites entra a frente de choque e a MPB.

Através dos plots de dados de elétrons, íons e campo para os intervalos utilizando o critério de órbita (≤ 5 RV), as fronteiras de plasma podem ser identificadas. Na Figura 6 observa-se o gráfico gerado pelo CCATI, e a partir dele identificamos cada fronteira.

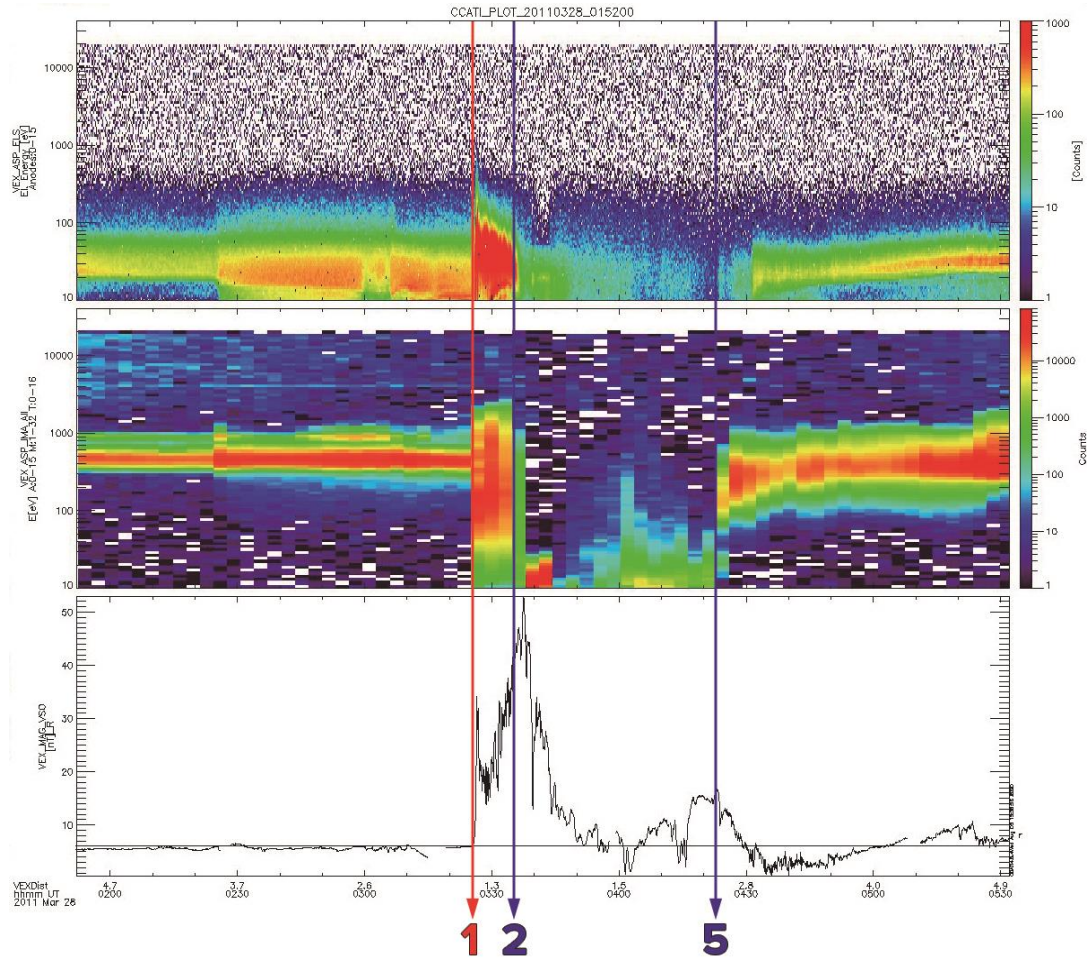
A primeira fronteira, frente de choque, pode ser identificada por um aumento repentino na contagem dos elétrons e dos íons devido compressão do plasma na região da bainha magnética, além de um aumento na amplitude do campo magnético, representado como linha vermelha sendo o 1 a entrada e o 6 a saída. As passagens pela Barreira Magnética são caracterizadas por uma diminuição na densidade de elétrons e íons e aumento do campo magnético devido ao empilhamento, a linha azul como numeração 2 e 5 representando a entrada e a saída da barreira. O PEB também é identificado onde o fluxo de elétrons e íons é muito baixo, e pela presença de elétrons entre 20 e 30 eV no espectro de elétrons. Todas as fronteiras são selecionadas visualmente por cliques, através desses critérios citados, e numeradas de 1 a 6 como dito na seção 3.

Figura 6: Gráfico gerado no CCATI com dados da VEX.



Não são todos os cruzamentos da VEX que é possível identificar todas as fronteiras, situações assim podem ocorrer devido ao fato do caminho da órbita percorrida do satélite ser diferente ou alguma interferência/ruído, dificultando encontrar algumas fronteiras. Na Figura 7 é um exemplo de um gráfico que não é possível identificar a PEB e saída da frente de choque.

Figura 7: Gráfico gerado no CCATI sem as fronteiras PEB e a saída da frente de choque.



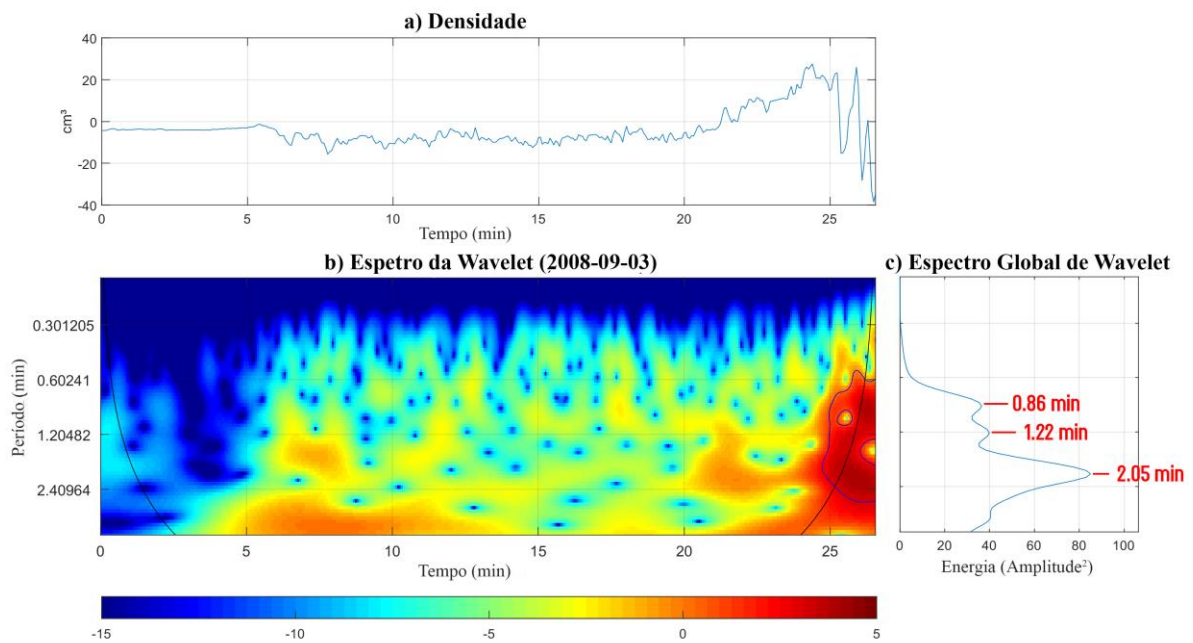
As identificações das fronteiras são de suma importância para obter o intervalo da bainha magnética, assim podemos analisar as principais frequência de ondas ULF.

4.2 Análise da Transformada de Wavelet

Para determinar as principais frequências encontradas nas ondas ULF na região bainha magnética de Vênus utilizamos a transformada wavelet. Foi aplicada a WT aos dados de densidade eletrônica da VEX em um total de 330 cruzamentos pela magnetobainha venusiana, sendo identificados 512 períodos entre os anos de 2006 e 2008.

Na Figura 8 mostra-se um exemplo da aplicação de WT, no período que VEX cruzou a magnetosfera entre 06:05 UT e 6:31 UT em 09 de setembro de 2008. Na Figura 8 c) nota-se a presença de três períodos principais: 0.86 min (20 mHz), 1.22 min (14 mHz), 2.05 min (8 mHz), aproximadamente. Após aplicar WT no cruzamento, dividimos os intervalos para realizar uma análise estatística.

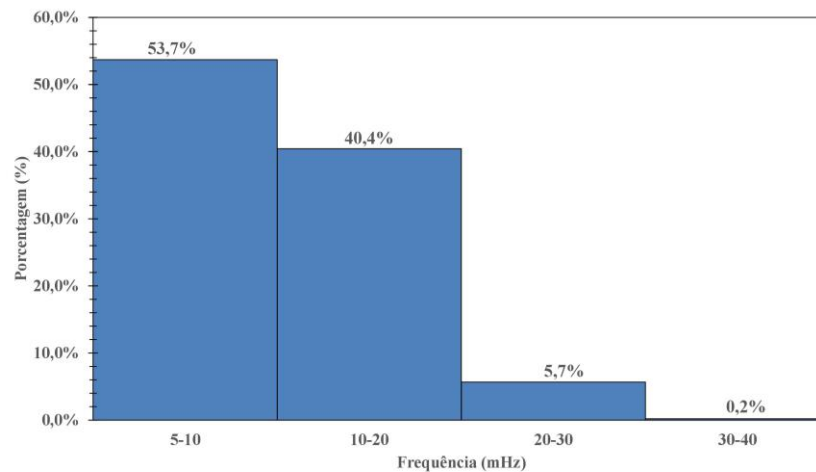
Figura 8: Gráfico gerado no MatLab a) Densidade eletrônica. b) Espectro de Wavelet. c) GWS.



Com as análises e os dados das principais frequências das ondas ULF na bainha magnética de Vênus, fizemos um histograma, Figura 9, descartando frequências inferiores à 5 mHz, pois estas podem sofrer influências do potencial da espaçonave, ou seja, a própria VEX com seu movimento pode gerar sinais falsos/artificiais que poderiam ser interpretados como ondas ULF, portanto essas frequências não são confiáveis (ESPLEY, CLOUTIER, *et al.*, 2004; LUNDIN, BARABASH, *et al.*, 2011). Dessa maneira, observa-se que as principais frequências encontradas estão nas faixas de 5-10 mHz com 53,7% e 10-20 mHz com 40,4% dentro de 512 períodos analisados. As frequências dominantes encontradas

nessa análise também foram observadas na bainha magnética da magnetosfera induzida de Marte (Franco et al. 2020).

Figura 9: Histograma da porcentagem com as principais frequência encontradas no GWS de 2006 a 2008 cruzadas na magnetosfera de Vênus.



5 CONCLUSÃO E FUTUROS TRABALHOS

Neste relatório foram apresentadas concepções de tipos de magnetosfera presentes no nosso sistema solar, visando compreender especificamente a magnetosfera de Vênus. partir da identificação dos cruzamentos de bainha magnética e dados da do satélite espaçonave *Venus Express* obtivemos resultados satisfatórios para acrescentar no entendimento físico da interação do vento solar com Vênus. Com as análises de dados utilizando a transformada de wavelet, usando dados para o intervalo entre 2006 e 2008, observou-se que na região da bainha magnética as principais frequências de ondas ULF estão entre 5-20 mHz , resultados similares aos obtidos para a bainha magnética de Marte (Franco et al. 2020).

O desenvolvimento deste trabalho teve muita importância para a complementação da aprendizagem do bolsista, além de desenvolver habilidades na área de física de magnetosferas planetárias, adquiriu domínio de uma importante ferramenta de análise de séries temporais, a transformada wavelet.

Os objetivos deste trabalho foram atingidos, ou seja, encontrar as principais frequências e catalogar as fronteiras de Vênus, podendo então para os próximos passos o bolsista determinar os histogramas dos períodos identificados pelo software CCATI e uma interpretação e comparação dos resultados obtidos.

6 Referências

BARABASH, S. E. A. ASPERA-4 : Analyser of Space Plasmas and Energetic Atoms. **Planetary and Space Science**, v. 55, p. 1772-1792, 2007.

BOLZAM, M. J. Análise da transformada em ondeletas aplicada em sinal geofísico. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 26, p. 37-41, 2004.

BOLZAM, 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.

BRAIN, D. A. Mars Global Surveyor Measurements of the Martian Solar Wind Interaction. **Space Science Reviews**, v. 126, p. 77-112, 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.

CLOUTIER, P. A.; DANIELL JR, R. E. Ionospheric currents induced by solar wind interaction with planetary atmospheres. **Planetary and Space Science**, v. 21, p. 463-474, March 1973.

CLOUTIER, P. A.; TASCIONE, T. F.; DANIELL JR, R. E. An electrodynamic model of electric currents and magnetic fields in the dayside ionosphere of Venus. **Planetary and Space Science**, v. 29, p. 635-652, June 1981.

DAS, A. C. Planetary Magnetospheres. **Pinsa**, p. 389-405, 1998.

DELVA, M.; DUBININ, E. Upstream ULF fluctuations near Mars. **Journal of Geophysical Research**, v. 100, p. 317-326, 1998.

DIÉVAL, C. et al. A case study of proton precipitation at Mars: Mars Express observations and hybrid simulations. **Journal of Geophysical Research**, v. 117, June 2012.

DUBININ, E.; FRAENZ, M. Ultra-Low-Frequency Waves at Venus and Mars: Keiling/Low-Frequency Waves in Space Plasmas. In: _____ **Low-Frequency Waves in Space Plasmas**. [S.l.]: [s.n.], 2016. p. Low-Frequency Waves in Space Plasmas.

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

ESPLEY, J. R. et al. Observations of low-frequency magnetic oscillations in the Martian magnetosheath, magnetic pileup region, and tail. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, v. 109, p. 1-12, 2004.

FRAENZ, M. et al. CCATi Interface for Tplot data products software-package for Ampterm, cluster CIS, Galileo PLS MAVEN, messenger FIPS, MEX/VEX Aspera, PVO MAG, STEREO and the SPICE system, 2016.

FRÄNZ, M. et al. Ultra low frequency waves at Venus: Observations by the Venus Express spacecraft. **Planetary and Space Science**, v. 146, p. 55-65, Outubro 2017.

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

GREENSTADT, E. W. et al. Correlation of Pc 3,4 and 5 activity with solar wind speed. **Journal of Geophysical Research**, v. 84, p. 6694-6696, 1979.

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

LEPPING, R. P.; BEHANNON, K. W. Magnetic field directional discontinuities: 1. Minimum variance errors. **Journal of Geophysical Research** , v. 85, p. 4695-4703, 1980.

LUHMANN, J. G. The solar wind interaction with Venus. **Space Science Reviews**, v. 44, p. 241-306, 1986.

LUHMANN, J. G. et al. The intrinsic magnetic field and solar-wind interaction of Mars. **Mars**, p. 1090-1134, 1992.

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

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

LUNDIN, R. et al. Low-altitude acceleration of ionospheric ions at Mars. **Geophysical Research Letters**, p. 1-11, 2011.

MA, Y. et al. Plasma Flow and Related Phenomena in Planetary Aeronomy. **Space Science Reviews**, v. 139, p. 311-353.

MAHAJAN, K. K. Planetary ionospheres: the Venus ionopause. **NISCAIR-CSIR**, v. 24, p. 269-279, 1995.

MARTINECZ, C. Plasma environment of Venus: Comparison of Venus. **JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH**, 2009.

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.

MITCHELL, D. L. et al. Probing Mars' crustal magnetic field and ionosphere with the MGS Electron Reflectometer. **Journal of Geophysical Research**, v. 106, p. 23419-23427, October 2001.

PARKER, E. N. Dynamics of the Interplanetary Gas and Magnetic Fields. **Astrophysical Journal**, v. 128, p. 664, 1958.

PARKER, E. N. Dynamical Theory of the Solar Wind. **Space Science Reviews**, v. 4, p. 666-708, Setembro 1965. ISSN 5-6.

PHILLIPS, J. L.; LUHMANN, J. G.; RUSSELL, C. T. Dependence of Venus ionopause altitude and ionospheric magnetic field on solar wind dynamic pressure. **Advance in Space Research**, v. 5, p. 173-176, 1985.

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.

RUSSELL, C. T. The dynamics of planetary magnetospheres. **Planetary and Space Science**, p. 1005-1030, 2001.

RUSSELL, C. T. et al. Upstream waves at Mars: phobos observations. **Geophysical Research Letters**, v. 17, p. 897-900, 1990.

RUSSELL, C. T.; ELPHIC, R. C.; SLAVIN, A. Initial Pioneer Venus Magnetic Field Results: Nightside Observations. **Science**, p. 114-116, 1979.

RUSSELL, C. T.; LUHMANN, J. G.; STRANGWAY, R. J. The solar wind interaction with Venus through the eyes of the pioneer Venus orbiter. **Planetary and Space Science**, v. 54, p. 1482-1495, 2006.

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

SLAVIN, et al. Position and shape of the Venus bow shock - Pioneer Venus Orbiter observations. **Geophysical Research Letters**, v. 6, p. 901-904, 1979.

SOUZA, A. et al. A study on Electron Oscillations in the Magnetosheath of Mars with Mars Express observations. **Proceedings of the International Astronomical Union**, p. 230-232, 2016.

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

VAISBERG, O. L.; ZELENY, L. M. Formation of the plasma mantle in the venusian magnetosphere. **Icarus**, v. 58, p. 412-430, 1984.

VOLWERK, M. et al. First identification of mirror mode waves in Venus' magnetosheath? **Geophysical Research Letters**, v. 35, 2008.

ZHANG, T. L.; LUHAMNN, J. G.; RUSELL, C. T. The magnetic barrier at Venus. **Journal of Geophysical Research**, p. 11145-11153, Julho 1991.