

Laura Neves Ribeiro do Amaral

**Análise comparativa da interação de Marte com  
eventos solares transitórios durante um mínimo  
e um máximo solar**

Brasil

Janeiro de 2019



Laura Neves Ribeiro do Amaral

**Análise comparativa da interação de Marte com eventos  
solares transitórios durante um mínimo e um máximo  
solar**

Dissertação apresentada ao programa de pós-graduação em física da Universidade Federal do Rio Grande como requisito para a obtenção do título de mestre em Física.

Universidade Federal do Rio Grande – FURG

Instituto de Matemática, Estatística e Física

Programa de Pós-Graduação em Física

Orientador: Dr. Cristian Giovanni Bernal

Coorientador: Dr. Primož Kajdič

Brasil

Janeiro de 2019

## Ficha catalográfica

A485a Amaral, Laura Neves Ribeiro do.

Análise comparativa da interação de Marte com eventos solares transitórios durante um mínimo e um máximo solar / Laura Neves Ribeiro do Amaral. – 2019.

61 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande – FURG, Programa de Pós-Graduação em Física, Rio Grande/RS, 2019.

Orientador: Dr. Cristian Giovanni Bernal.

Coorientador: Dr. Primož Kajdič.

1. Ionosfera 2. Marte 3. Ejeção de Massa Coronal Interplanetária  
I. Bernal, Cristian Giovanni II. Kajdič, Primož III. Título.

CDU 523:523.43



ATA 01/2019

ASSUNTO: DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE LAURA NEVES RIBEIRO DO AMARAL

Ao décimo sétimo dia do mês de janeiro de 2019 no horário das 14:00 às 15:30 horas, foi realizada na sala 2207 do pavilhão 2 a defesa pública da dissertação de mestrado de **Laura Neves Ribeiro do Amaral**, intitulada “Análise comparativa da interação de Marte com eventos solares transitórios durante um mínimo e um máximo solar”. A banca examinadora, constituída pelo professor orientador Dr. Cristian Giovanni Bernal (FURG) e pelos professores Dr. Primoz Kajdic (Universidad Nacional Autónoma de México), e Dr. Magno Pinto Collares (FURG), aprovou a candidata (**Laura Neves Ribeiro do Amaral**) com conceito 9.5. Foi concedido um prazo de 2 dias para a candidata efetuar as correções sugeridas pela banca examinadora e apresentar o trabalho em sua redação definitiva, sob a pena de não expedição do Diploma. A presente ata é assinada pelos membros da banca examinadora.

GIOVANNY BERNAL

Prof. Dr. Cristian Giovanni Bernal

(Presidente)

Primoz Kajdic

Prof. Dr. Dr. Primoz Kajdic

(Universidad Nacional Autónoma de México)

Magno Pinto Collares

Prof. Dr. Magno Pinto Collares

(FURG)

*Este trabalho é dedicado aos meus avós paternos, Jader da Costa Amaral(In memoriam)  
e Laura Louzada de Almeida(In memoriam).*

# Agradecimentos

Gostaria de agradecer primeiramente ao meu orientador e amigo, Dr. Cristian Giovanni Bernal, por sempre acreditar no meu potencial, e por ser uma constante fonte de inspiração no trabalho, devido ao seu conhecimento, curiosidade e empolgação com a ciência. Se hoje estou concluindo o mestrado, é graças a ele.

Gostaria de agradecer ao meu coorientador Dr. Primož Kajdič e a Dra. Xochitl Guillermina Blanco Cano, que me receberam durante a minha estadia de investigação no México, e me ensinaram a física do clima espacial.

Agradecer à PPG-Física da FURG, que me permitiu realizar a estadia de investigação na Universidade Nacional Autónoma do México, enquanto eu fazia o mestrado na FURG.

Agradecer ao professor Dr. Magno Pinto Collares por ter gentilmente aceito compor a banca de avaliação da minha dissertação.

Agradecer à minha família pelo apoio; Ao Àngel, por ser sempre tão querido e amoroso ao ponto de escanear um livro inteiro de 500 páginas para ajudar como referência nesta dissertação; A minha amiga Minari, por fazer eu acreditar e gostar de mim mesma; Ao Joelson pela comida maravilhosa, pelo carinho, e pela parceria, faça chuva ou Sol; Ao Calígula e Geferson, por serem sempre tão prestativos quando pedi ajuda e ao Felipe por aguentar minhas teorias loucas, a consultoria em python e tirar minhas dúvidas em relatividade.

Agradecer aos meus catoríneos, Marte e Quark pela paciência comigo e por seu carinho incondicional sempre que chego em casa, e as minhas gatinhas, Marie, Cinza, Polaca, Perseu, Ptolomeu e Luna, pelo carinho e ronrons quando eu mais precisava.

E por último e não menos importante, muito obrigado e parabéns a mim mesma, por não ter me abandonado e ter sido persistente quando eu mais precisei. "Continue a nadar, continue a nadar" [...]

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.



*"O que é mais assustador?  
A idéia de extraterrestres em mundos estranhos,  
ou a idéia de que, em todo este imenso universo,  
nós estamos sozinhos?"*  
*Carl Sagan*



# Resumo

Neste trabalho foram analisados os impactos de duas ejeções de massa coronal interplanetárias (ICMEs) no sistema local de plasma de Marte durante o período de mínimo solar do ano de 2007 e o período de máximo solar do ano de 2012, usando os dados dos instrumentos ELS e IMA, do experimento ASPERA-3 que encontra-se a bordo da nave MEX. Foi observada que a resposta do sistema local de plasma marciano é mais acentuada durante o evento de 2007, com as estruturas do sistema variando mais que durante o evento de 2012. A compressão da ionosfera foi mais evidente no evento de 2007 que no impacto de 2012. Durante ambos os eventos, grandes fluxos de elétrons na faixa de energia de 100eV e íons de  $H^+ + O^+$  na faixa de 5 keV são observados na magnetofunda após o impacto de cada ICME. Estes foram maiores no evento de 2007. A extensão da região aumenta durante o evento de 2007, voltando ao normal depois de 2 órbitas, enquanto que no evento de 2012, a região permaneceu perturbada, variando pouco até o fim das medidas. Nas órbitas 4997, 98, 99 e 5000 do evento de 2007, bem como nas órbitas 10459, 60 e 64, existe a possibilidade de haver ocorrido erosão da região ionosférica, uma vez que além da ionosfera diminuir seu tamanho, elétrons e íons com energias acima de 20 eV são detectados na região. A contínua presença de íons energéticos dentro da cavidade ionosférica e magnetofunda, bem como uma maior quantidade destes nos dados de 2012 que em 2007, mostram que estas regiões apresentaram maior ionização.

**Palavras-chaves:** Ionosfera. Marte. Ejeção de Massa Coronal Interplanetária.



# Abstract

In this work, the impacts of two interplanetary coronal mass ejections (ICMEs) were analyzed in the local plasma system of Mars during the solar minimum period of 2007 and the solar maximum period of 2012, using ELS and IMA, from ASPERA-3 experiment that is aboard the MEX ship. It was observed that the response of the local system of Martian plasma is more pronounced during the event of 2007, where the structures of the system varying more than during the event of 2012. The compression of the ionosphere was more evident in the event of 2007 than in the impact of 2012. During both events, large fluxes of superthermal electrons in the energy range of 100eV and  $H^+ + O^+$  ions in the 5 keV energy range are observed in the magnetosheath, after the impact of each ICME. These were larger in the 2007 event. The region's extent increases during the 2007 event, returning to normal after 2 orbits, while in 2012, the region remained disturbed, varying little until the end of the measurements. In the orbits 4997, 98, 99 and 5000 of the 2007 event, as well as in the orbits 10459, 60 and 64, there is the possibility of erosion of the ionospheric region, since in addition to the ionosphere decrease its size, electrons and ions with energies above 20 eV are detected in the region. The reason for the local Martian plasma system varies more during the 2007 event than the 2012 event is due to the fact that during the 2012 event, the Sun was in its maximum period, meaning that the Martian ionosphere, which represents an obstacle that the solar wind can not penetrate, is more ionized and therefore more rigid. The continue presence of energetic ions inside the ionospheric cavity and magnetosheath, as well increase of this species on 2012, show us which this regions presents a ionization rate on 2012 greater than the 2007 case.

A contínua presença de íons energéticos dentro da cavidade ionosférica e magnetofunda, bem como uma maior quantidade destes nos dados de 2012 que em 2007, mostram que a região apresentou maior ionização.

**Key-words:** Ionosphere. Mars. Interplanetary Coronal Mass Ejection.



# Resumen

En este trabajo se analizaron impactos de dos eyecciones de masa coronal interplanetaria (ICME) en el sistema local de plasma de Marte durante el período de mínimo solar del año 2007 y el período de máximo solar del año 2012, utilizando los datos de los instrumentos ELS y IMA, del experimento ASPERA-3 que se encuentra a bordo de la nave MEX. Se observó que la respuesta del sistema local de plasma marciano es más acentuada durante el evento de 2007, con las estructuras del sistema variando más que durante el evento de 2012. La compresión de la ionosfera fue más evidente en el evento de 2007 que en el impacto de 2012. En ambos eventos, grandes flujos de electrones en el rango de energía de 100eV e iones de  $H^+ + O^+$  en la banda de 5 keV se observan en la magnetofunda después del impacto de cada ICME. Estos fueron mayores en el evento de 2007. La extensión de la región se incrementa durante el evento de 2007, volviendo a la normalidad después de 2 órbitas, mientras que en el evento de 2012, la región permaneció perturbada, variando poco hasta el final de las medidas. En las órbitas 4997, 98, 99 y 5000 del evento de 2007, así como en las órbitas 10459, 60 y 64, existe la posibilidad de que haya ocurrido erosión de la región ionosférica, ya que además de la ionosfera disminuir su tamaño, electrones e iones con energías por encima de 20 eV se detectan en la región. El motivo del sistema local de plasma marciano variar más durante el evento de 2007 que el evento de 2012 se da al hecho de que durante el evento de 2012, el Sol estaba en su período de máximo, significando que la ionosfera marciana, que representa un obstáculo que el viento solar no puede penetrar, es más ionizado y, por lo tanto, más rígido. La continua presencia de iones energéticos dentro de la cavidad ionosférica y de la magnetofunda, así como el incremento de esta especie en 2012, muestra qué estas regiones presentan una ionización en 2012 mayor que en el caso de 2007.

**Palabras clave:** Ionosfera. Marte. Eyección de masa coronal Interplanetaria.



# Lista de ilustrações

Figura 1 – Medidas dos parâmetros que descrevem o vento solar no mês de junho de 1995, durante o período de mínimo solar entre os ciclos 22 e 23, feitas a uma distância de 1 AU do Sol pela espaçonave <i>Wind</i> . De cima para baixo, nos gráficos, temos a velocidade em km/s, a densidade numérica em partículas por cm <sup>3</sup> e a componente radial do campo magnético do Sol no equador solar, junto a latitude da nave com respeito a HCS <sup>1</sup> representada pela linha tracejada. Retirado de Meyer-Vernet [2007], cortesia de C. Salem. . . . .	29
Figura 2 – Rotação diferencial do Sol, que dá origem a eventos de CMEs. ESA. . .	30
Figura 3 – Diagrama mostrando a distribuição média diária de manchas solares em diferentes latitudes sobre a fotosfera do Sol entre os anos 1874 e 2017. NASA/Marshall Solar Physics . . . . .	30
Figura 4 – A Figura mostra 3 painéis, que de cima para baixo são, o ajuste, em azul, do número médio mensal de manchas solares, em vermelho, (dados retirados do SILSO <sup>2</sup> , Royal Observatory of Belgium, Brussels), a irradiância solar total e fluxo em raios X do Sol entre 0.1 nm e 10 nm, entre os anos 2007 e 2018 (dados retirados do SOURCE <sup>3</sup> ) medidos a 1 AU do Sol. As linhas verticais que cortam os três gráficos são os momentos que ocorreram os eventos estudados neste trabalho. . . . .	31
Figura 5 – Imagens do Sol em 195 Å feitas pelo instrumento SECCHI - EUVI <sup>4</sup> a bordo do observatório STEREO-A <sup>5</sup> em 0.95 AU. A Figura 5a mostra o Sol no dia do evento de novembro de 2007 e a Figura 5b mostra o Sol no dia do evento de março de 2012. NASA STEREO mission. . . . .	32

---

<sup>1</sup> Do inglês *Heliospheric Current Sheet*. A HCS é linha onde o campo magnético do Sol muda de polaridade, e se estende por toda a heliosfera.

<sup>2</sup> *Sunspot Index and Long-term Solar Observations*

<sup>3</sup> *Solar Radiance and Climate Experiment*

<sup>4</sup> Do inglês *Sun Earth Connection Coronal and Heliospheric Investigation* e *Extreme Ultraviolet Imager*

<sup>5</sup> Do inglês *Solar TERrestrial RELations Observatory Ahead*

Figura 6 – Medidas dos parâmetros que descrevem uma S/CIR entre os dia 6 e 10 de maio de 2007, feitas a uma distância de aproximadamente 0.95 AU pelo observatório STEREO A. De cima para baixo, no gráfico, temos a magnitude do campo magnético em nT, as componentes do campo magnético, a densidade numérica em partículas por $\text{cm}^3$ , a magnitude da velocidade em km/s, a pressão dinâmica em dinas por centímetro quadrado e a temperatura em K. Entre as 00h00min00s UT do dia 6 de março e pouco antes das 09h00min00s UT do dia 7 de março, está o vento solar lento. Entre as 09h00min00s UT do dia 7 de março e as 21h00min00s UT do dia 9 de março, está uma S/CIR. Feito com CLWeb.	33
Figura 7 – Modelo esquemático da formação de uma região de interação de corrente corrotante (CIR). Retirado de Pizzo [1978].	34
Figura 8 – Sistema local de plasma marciano, evidenciando a magnetosfera induzida de Marte e suas estruturas. Retirado de Lillis et al. [2015], cortesia de S. Bartlett.	36
Figura 9 – Processo de formação da ionosfera de um planeta com atmosfera não-magnetizado. Retirado de Kivelson [1995].	37
Figura 10 – Exemplo de dado registrado pelo experimento ASPERA-3, através dos instrumentos A) ELS e B) IMA. Os dois primeiros gráficos mostram, respectivamente, a contagem de elétrons e íons ( $\text{H}^+ + \text{O}^+$ ), em escala logarítmica, nas faixas de energia de 10 eV - 10 keV ao longo do tempo no dia 24 de junho de 2010. O terceiro gráfico C) mostra a altitude em km da sonda MEX do planeta Marte, com o periapsis da sua órbita indicado pela linha vertical traçada em 18h55min00s UT. No cabeçalho e rodapé da figura estão indicadas as regiões do sistema local de plasma de marciano, por onde a sonda passa ao longo da sua órbita.	40
Figura 11 – Órbitas da MEX em coordenadas MSO <sup>6</sup> durante o evento de 2007 e 2012. O círculo vermelho representa o planeta Marte, onde a parte pintada em vermelho é o lado noite e em branco o lado dia (virado para o Sol) do planeta. A linha pontilhada indica a posição média do choque de proa e a linha tracejada a a posição média da barreira magnética do planeta. Os triângulos e os losangos indicam onde a nave cruzou o choque de proa e a ionosfera, respectivamente. A seta roxa indica o sentido da órbita da nave. A figura do plano YZ mostra o choque de proa e a barreira magnética no plano terminador do planeta. Cada órbita é representada por uma cor, conforme mostra o cabeçalho da figura.	41

Figura 12 – Configuração do sistema solar interno durante os eventos de CME estudados em coordenadas HEE <sup>7</sup> . Em amarelo está o Sol, verde a Terra, da órbita mais interna para a externa estão Mercúrio, Vênus e Marte. Em azul está a sonda STEREO B e em vermelho a sonda STEREO A. Feito com <i>Stereo Science Center</i> . . . . .	42
Figura 13 – Eventos de ICME de 20 novembro de 2007 e 15 Março de 2012 hachurados em amarelo, seguidos por um vento solar rápido, observados pela missão ACE em 1 AU de distância do Sol. A magnetofunda de ambos eventos está destacada em roxo, enquanto que o círculo laranja indica o <i>flux rope</i> da ICME. Feito com CIWeb. . . . .	44
Figura 14 – Dados do vento solar entre 20 de outubro de 2007 e 20 de dezembro de 2007 (Figura 14a) e entre 15 de fevereiro de 2012 e 15 de abril de 2012 (Figura 14b), observados pela missão ACE em 1 AU de distância do Sol. O início e o fim dos eventos de ICME de 20 novembro de 2007 e 15 Março de 2012 estão delimitados por duas linhas verticais pretas. Feito com CIWeb. . . . .	45
Figura 15 – Órbitas da MEX em coordenadas MSO durante o evento de 2007 (esquerda) e 2012 (direita). O círculo de borda vermelha representa o planeta Marte. A linha pontilhada indica a posição média do choque de proa e a linha tracejada a a posição média da barreira magnética do planeta. Os triângulos e os losangos indicam onde a nave cruzou o choque de proa e a ionosfera, respectivamente. O choque de proa e a barreira magnética estão representados no plano terminador do planeta. Cada órbita é representada por uma cor, conforme mostra o cabeçalho da figura. . . . .	48
Figura 16 – Sequência de dados do instrumento ELS para o evento de novembro de 2007. Cada painel da figura mostra a contagem de elétrons na faixa de energia até 10 <sup>4</sup> eV, entre os dias 21 e 23 de novembro de 2007 (De cima para baixo, os painéis mostram as órbitas 4991, 92, 97, 98, 99, 5000 e 5001), 3 horas antes e depois do periapsis de cada órbita. A linha vertical preta no centro de cada painel indica o periapsis da órbita da MEX. . . . .	50

- Figura 17 – Sequência de dados do instrumento IMA para o evento de novembro de 2007. Cada painel da figura mostra a contagem de íons de  $H^+ + O^+$  na faixa de energia até  $10^4$  eV, entre os dias 21 e 23 de novembro de 2007 (De cima para baixo, os painéis mostram as órbitas 4991, 92, 97, 98, 99, 5000 e 5001), 3 horas antes e depois do periapsis de cada órbita. A linha vertical preta no centro de cada painel indica o periapsis da órbita da MEX. No painel da órbita 4999, o instrumento apresenta mal funcionamento na tomada dos dados, entre as 11h10min00s UT e as 12h00min00s UT do dia 23 de novembro. . . . . 51
- Figura 18 – Sequência de dados do instrumento ELS para o evento de março de 2012. Cada painel da figura mostra a contagem de elétrons na faixa de energia até  $10^4$  eV, entre os dias 17 e 20 de março de 2012 (De cima para baixo, os painéis mostram as órbitas 10459, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69 e 10470), 3 horas antes e depois do periapsis de cada órbita. A linha vertical preta no centro de cada painel indica o periapsis da órbita da MEX. . . . . 52
- Figura 19 – Sequência de dados do instrumento IMA para o evento de março de 2012. Cada painel da figura mostra a contagem de íons de  $H^+ + O^+$  na faixa de energia de até 20 keV, entre os dias 17 e 20 de março de 2012 (De cima para baixo, os painéis mostram as órbitas 10459, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69 e 10470), 3 horas antes e depois do periapsis de cada órbita. A linha vertical preta no centro de cada painel indica o periapsis da órbita da MEX. . . . . 53

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Valores médios observados dos parâmetros do vento solar a 1 AU. De cima para baixo, na tabela, temos a densidade numérica em partículas por $\text{cm}^3$ de prótons, elétrons e partículas $\alpha$ , a temperatura em K de prótons e elétrons, a velocidade do vento e a velocidade do som em km/s, a magnitude do campo magnético em nT e o tempo médio que o vento demora para fluir desde a corona até a Terra (Aproximadamente 1 AU). Retirado de <a href="#">Kivelson [1995]</a> . . . . .	28
--	----



# Lista de abreviaturas e siglas

ACE	Advanced Composition Explorer
ASPERA-3	Analysér of Space Plasma and Energetic Atoms
BS	Choque de Proa
CME	Ejeção de Massa Coronal
CIR	Região de Interação Corrotante
ICME	Ejeção de Massa Coronal Interplanetária
IMA	Ion Mass Analyzer
ELS	ELectron Spectrometer
EUV	Extremo Ultravioleta
EUVI	Extreme Ultraviolet Imager
GSE	Geocentric solar ecliptic
HCS	Heliospheric Current Sheet
HEE	Heliocentric Earth Ecliptic
IMB	Induced Magnetic Boundary
MARSIS	Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionosphere Sounding
MEX	Mars Express
MSO	Mars-Solar-Orbital
NASA	National Aeronautics and Space Administration
PEB	Photoelectron Boundary
SECCHI	Sun Earth Connection Coronal and Heliospheric Investigation
SILSO	Sunspot Index and Long-term Solar Observations
SIR	Região de Interação de Corrente
SOURCE	Solar Radiance and Climate Experiment
STEREO	Solar TERrestrial RELations Observatory
UV	Ultravioleta



# Lista de símbolos

Å	Ångstrom
$a$	Velocidade do som no ambiente do vento solar
AU	Unidade astronômica
B	Magnitude do campo magnético
$\text{cm}^{-3}$	Inverso do centímetro cúbico
$\text{H}^+$	Hidrogênio uma vez ionizado
h	Hora
K	Kelvin
km/s	kilometros por segundo
min	Minuto
$n_{e^-}$	Densidade numérica dos prótons
$n_{\text{He}^{2+}}$	Densidade numérica dos prótons
nm	Nanometro
$n_P$	Densidade numérica dos prótons
nT	NanoTesla
$\text{O}^+$	Oxigênio uma vez ionizado
s	Segundo
$t_{1AU}$	Tempo médio que o vento demora para fluir desde a corona solar até a Terra
$T_{e^-}$	Temperatura dos prótons
$T_P$	Temperatura dos prótons
UT	Tempo universal
$v$	Velocidade do vento solar



# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>27</b>
1.1	Vento Solar	28
1.2	Ciclo solar	28
1.3	Eventos solares transitórios	31
1.4	Ambiente do Plasma Marciano	35
1.5	Objetivo e Justificativa	37
<b>2</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>39</b>
2.1	Instrumentação e leitura dos dados	39
2.2	Órbitas da MEX	40
2.3	Observações a 1 AU e configuração do sistema solar em Novembro de 2007 e Março de 2012	42
<b>3</b>	<b>ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS EVENTOS</b>	<b>47</b>
3.1	Posição das estruturas do sistema de plasma marciano durante as ICMEs de novembro de 2007 e março de 2012	47
3.2	Observações a 1.6 AU do impacto da ICME de 22 de Novembro de 2007	47
3.3	Observações a 1.6 AU do impacto da ICME de 17 de Março de 2012	49
<b>4</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>55</b>
4.1	Resultados obtidos	55
4.2	Conclusões	56
4.3	Trabalho em andamento	56
	Referências	57



# 1 Introdução

O clima espacial pode ser definido como o estado das condições de atividade do Sol, do vento solar e do sistema local de plasma dos planetas do sistema solar. Conforme o vento solar flui da corona solar, ele alcança os planetas, e interage com eles. Na Terra essa interação ocorre com sua magnetosfera, que serve como obstáculo para estes fluxos de partículas. Já em planetas não-magnetizados, como Vênus e Marte, a interação ocorre diretamente com a atmosfera do planeta.

Os efeitos das ejeções de massa coronal interplanetárias<sup>1</sup> (montante de plasma que se encontra no meio interplanetário e que foi ejetado do Sol, daqui em diante ICME), na ionosfera de Marte durante um máximo solar foram estudados (por exemplo os trabalhos de [Morgan et al.](#) e [Opgenoorth et al.](#)). Em 2014, [Morgan et al.](#) publicaram um estudo de caso de um forte evento ICME, em junho de 2011, que foi detectado pela missão *Mars Express* (MEX). Foi observado uma forte compressão da ionosfera, uma órbita antes do máximo do evento de ICME, bem como uma diminuição da espessura da região de 130 km para 100 km durante o máximo do evento. A magnetofunda foi notada em uma posição mais baixa que o normal, indicando não só uma compressão, como também uma possível erosão da ionosfera.

Durante o período de mínimo, existe um único estudo, feito por [Sánchez-Cano et al.](#). Nele, foi analisado o impacto de uma ICME menos intensa, seguida de uma região de interação de corrente<sup>2</sup> (SIR), no sistema de plasma marciano. Os autores usaram dados da sonda MEX, medidos durante o mês de março de 2008, ao longo de 5 dias. Foi observado que durante o período de mínimo solar, a resposta do sistema de plasma marciano varia muito. No entanto para uma ICME pouco intensa, a resposta é semelhante em pequena escala a resposta durante o período de máximo. Foi constatado também que pequenos aumentos na pressão dinâmica do vento solar produzem grandes perturbações no sistema.

Durante a revisão de estudos anteriores do clima espacial de Marte, é possível notar a recorrência de estudos de casos específicos sobre a interação das ICME com a ionosfera de Marte. Usando o conhecimento obtido através de tais pesquisas, neste trabalho foi traçada uma maneira de conhecer os pontos relevantes dessas interações, através de um estudo comparativo de duas ICMEs, em diferentes períodos do ciclo solar. Assim, podemos começar a analisar o problema não como casos isolados, mas comparar com estudos anteriores de impactos de ICMEs em períodos similares e ver como as características das partículas do meio interplanetário afetam a interação, bem como buscar padrões de características em impactos de ICMEs semelhantes.

---

<sup>1</sup> Do inglês *Interplanetary Coronal Mass Ejection*.

<sup>2</sup> Do inglês *Stream Interaction Region*.

Neste trabalho é feito um estudo através da análise e interpretação dos dados da sonda MEX (que orbita Marte, cruzando desde a região do vento solar até a ionosfera do planeta). Para as análises foram utilizados dados dos impactos de duas ejeções de massa coronal interplanetárias sobre o ambiente espacial do planeta Marte. Na subseções que seguem, serão apresentados conceitos básicos para o entendimento do estudo.

## 1.1 Vento Solar

O vento solar é um plasma de partículas carregadas (elétrons, prótons e outros íons mais pesados) que escapam da corona solar devido a alta temperatura nessa região ( $\sim 10^6$  K) e ao fato da pressão térmica do meio interplanetário ser menor que a da corona, sendo então incapaz de conter sua expansão [Meyer-Vernet, 2007]. Ele é um fluxo contínuo e não relativístico de partículas, que a uma distância de 1 AU<sup>3</sup>, é caracterizado pelos parâmetros da tabela 1. A tabela mostra os valores médios que os parâmetros do vento solar possuem em condições comuns (chamado vento solar lento), no período de mínimo (quando o campo magnético solar é semelhante a um dínamo). Na Figura ??, podemos ver um exemplo das medidas dos parâmetros que descrevem o vento durante os 40 últimos dias do primeiro semestre do ano de 1995, durante o período de mínimo solar entre os ciclos 22 e 23 (Ver sessão 1.2), feitas pelo satélite ACE<sup>4</sup>.

$n_p$	$6.6 \text{ cm}^{-3}$
$n_{e^-}$	$7.1 \text{ cm}^{-3}$
$n_{He^{2+}}$	$0.25 \text{ cm}^{-3}$
$T_p$	$1.2 \times 10^5 \text{ K}$
$T_{e^-}$	$1.4 \times 10^5 \text{ K}$
$v$	$450 \text{ km/s}$
$a$	$60 \text{ km/s}$
$B$	$7 \text{ nT}$
$t_{1AU}$	$\sim 4 \text{ dias}$

Tabela 1 – Valores médios observados dos parâmetros do vento solar a 1 AU. De cima para baixo, na tabela, temos a densidade numérica em partículas por  $\text{cm}^3$  de prótons, elétrons e partículas  $\alpha$ , a temperatura em K de prótons e elétrons, a velocidade do vento e a velocidade do som em km/s, a magnitude do campo magnético em nT e o tempo médio que o vento demora para fluir desde a corona até a Terra (Aproximadamente 1 AU). Retirado de Kivelson [1995].

## 1.2 Ciclo solar

Devido ao Sol ser uma esfera de plasma em rotação (ou seja, não é um corpo rígido), ele possui uma rotação diferencial entre os polos e seu equador. Assim, as partículas

<sup>3</sup> 1 AU equivale a distância entre a Terra e o Sol, aproximadamente 149,598,000 km.

<sup>4</sup> Do inglês *Advanced Composition Explorer*.

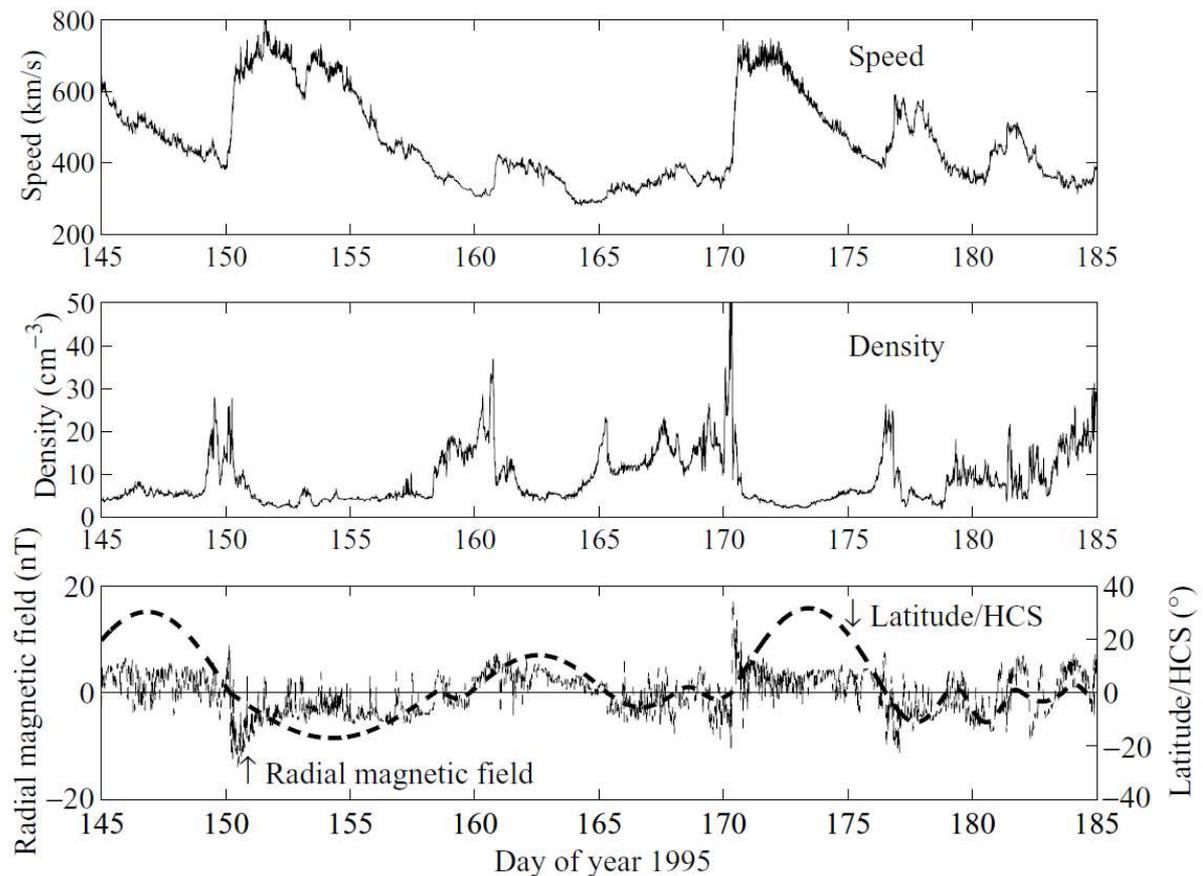


Figura 1 – Medidas dos parâmetros que descrevem o vento solar no mês de junho de 1995, durante o período de mínimo solar entre os ciclos 22 e 23, feitas a uma distância de 1 AU do Sol pela espaçonave *Wind*. De cima para baixo, nos gráficos, temos a velocidade em km/s, a densidade numérica em partículas por cm<sup>3</sup> e a componente radial do campo magnético do Sol no equador solar, junto a latitude da nave com respeito a HCS<sup>a</sup> representada pela linha tracejada. Retirado de Meyer-Vernet [2007], cortesia de C. Salem.

<sup>a</sup> Do inglês *Heliospheric Current Sheet*. A HCS é linha onde o campo magnético do Sol muda de polaridade, e se estende por toda a heliosfera.

carregadas do plasma que levam consigo as linhas de campo magnético, conforme se movimentam, fazem com que tais linhas sofram um entrelaçamento em torno da estrela, saindo de uma configuração inicialmente poloidal e passando para uma toroidal (figura 2).

Nas regiões onde ocorre esse fenômeno, as linhas de campo formam laços que geram polos magnéticos locais (como pequenos dínamos). Em tais zonas a densidade de linhas de campo magnético é alta, formando então as chamadas regiões ativas. Devido a isso a convecção é dificultada, diminuindo a temperatura local e formando as chamadas manchas solares nesses pontos. Conforme o Sol gira, seu campo magnético solar sofre o processo de enlace de suas linhas continuamente, gerando mais regiões ativas e aumentando portanto a sua atividade. As manchas formadas então movem-se dos polos em direção ao equador, até desaparecerem totalmente. Quando novas manchas são surgem nos polos outra vez,

agora com polaridade inversa, o processo reinicia e um novo ciclo solar começa (Figura 3).

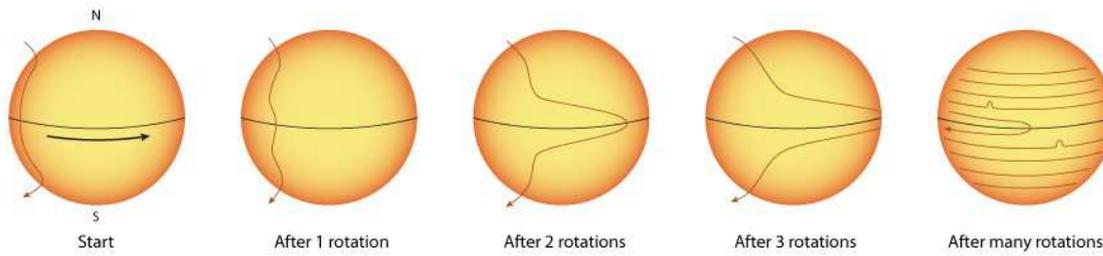


Figura 2 – Rotação diferencial do Sol, que dá origem a eventos de CMEs. ESA.

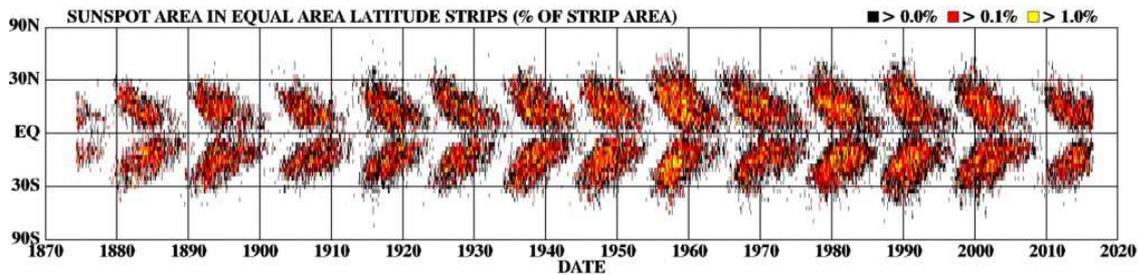


Figura 3 – Diagrama mostrando a distribuição média diária de manchas solares em diferentes latitudes sobre a fotosfera do Sol entre os anos 1874 e 2017. NASA/Marshall Solar Physics

Tal ciclo possui um período de baixa e alta atividade, chamados período de mínimo e máximo solar (Figura 5). Durante o período de mínimo, o campo magnético é semelhante a um dínamo (com as linhas de campo abertas muito próximo aos polos e fechadas no equador), apresentando poucas manchas solares e frequência de eventos de CME reduzida. Já no período de máximo, a atividade solar é alta, uma vez que o campo magnético encontra-se em uma configuração sem direção preferencial, fazendo com que muitas regiões ativas estejam espalhadas por ele, aumentando a frequência de eventos de CME.

Um ciclo solar inteiro dura aproximadamente 11 anos, e desde 1755 foram contados 24 ciclos. Atualmente, estamos no ciclo 24, entretanto, o ciclo 25 iniciou simultaneamente em dezembro de 2016, onde a sua primeira mancha solar de polaridade invertida foi observada no polo sul do Sol enquanto outras manchas do ciclo 24 ainda eram visíveis.

Além do número de manchas solares e da frequência de CMEs mudar ao longo do ciclo solar, o fluxo de radiação ionizante também muda [Lean, 1991]. Na Figura 4 podemos ver como o fluxo de raios X entre 0.1 nm e 10 nm varia entre o último mínimo (2007) até a data atual (2018). Essa variação no fluxo entre os períodos de máximo e mínimo do ciclo solar gera uma ionização da exosfera marciana (ver seção 1.4), tornando-a mais condutora e portanto mais resistente a influência de eventos transitórios solares.

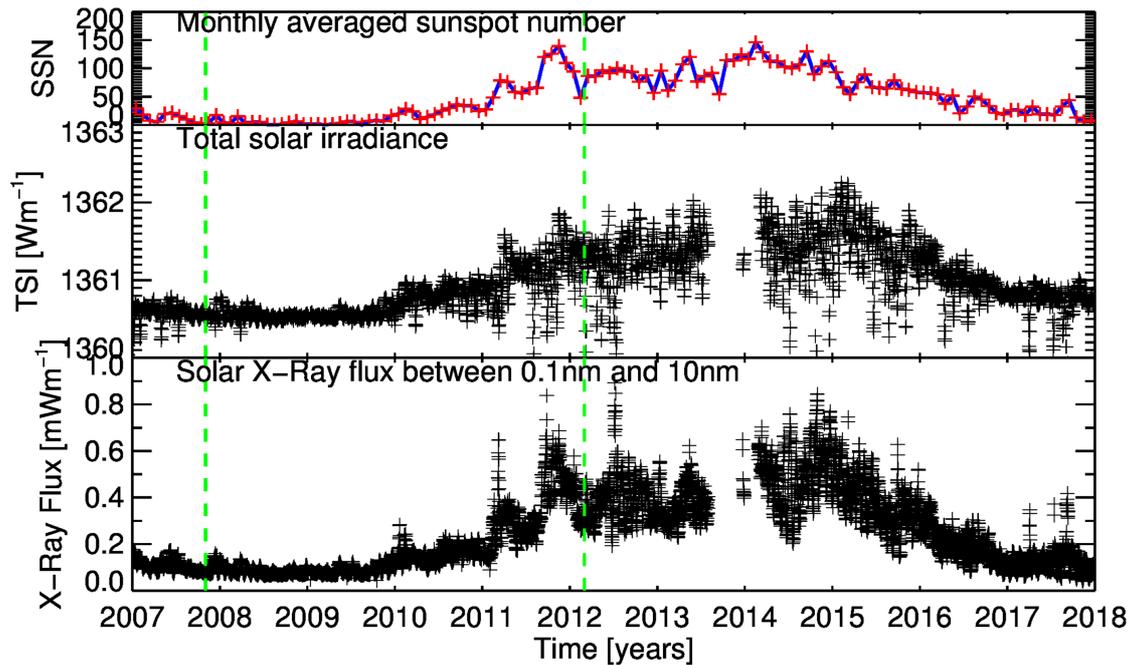


Figura 4 – A Figura mostra 3 painéis, que de cima para baixo são, o ajuste, em azul, do número médio mensal de manchas solares, em vermelho, (dados retirados do SILSO<sup>a</sup>, Royal Observatory of Belgium, Brussels), a irradiância solar total e fluxo em raios X do Sol entre 0.1 nm e 10 nm, entre os anos 2007 e 2018 (dados retirados do SOURCE<sup>b</sup>) medidos a 1 AU do Sol. As linhas verticais que cortam os três gráficos são os momentos que ocorreram os eventos estudados neste trabalho.

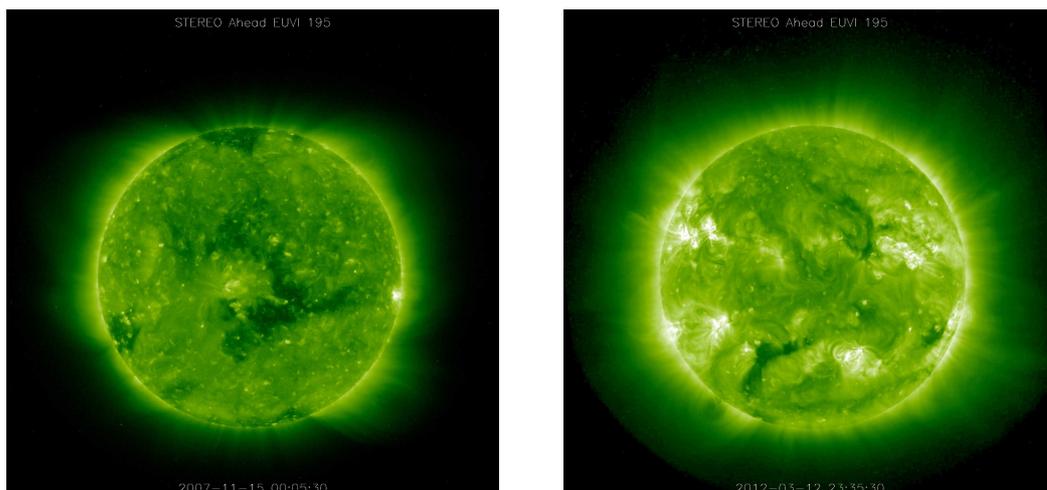
<sup>a</sup> *Sunspot Index and Long-term Solar Observations*

<sup>b</sup> *Solar Radiance and Climate Experiment*

### 1.3 Eventos solares transitórios

Quando a tensão magnética nas regiões de forte emaranhamento de campo magnético (regiões ativas) cresce muito, ocorre o rompimento das linhas de campo local, e o plasma aprisionado nessas linhas escapa do domínio da corona solar, dando origem ao evento chamado ejeção de massa coronal<sup>5</sup> (CME). Estas estruturas possuem campo magnético, densidade, pressão e velocidade maiores que do vento solar, perturbando o meio interplanetário por onde passa. Elas são caracterizadas pelo módulo do campo magnético ser maior que o do vento solar antes da sua passagem (Uma CME típica apresenta uma magnitude de campo de 20 nT, mas alcança valores maiores), e por este ser em forma de montanha, sendo precedido por uma perturbação com aumento da densidade (Região chamada magnetofunda). Possui ainda rotação nas suas componentes de campo magnético e densidade maior que a do vento solar (Uma CME típica apresenta densidade maior que 5 partículas por cm<sup>3</sup>) e velocidade acima de 400 km/s. Dessa forma, quando uma CME intercepta um planeta (Agora então chamada ICME), pode mudar momentaneamente as

<sup>5</sup> Do inglês *Coronal Mass Ejection*.



(a) Sol no período de mínimo, no dia 15 de novembro de 2007, as 00h05min30s UT. (b) Sol no período de máximo, no dia 12 de março de 2012, as 23h35min30s UT.

Figura 5 – Imagens do Sol em 195 Å feitas pelo instrumento SECCHI - EUVI <sup>a</sup> a bordo do observatório STEREO-A <sup>b</sup> em 0.95 AU. A Figura 5a mostra o Sol no dia do evento de novembro de 2007 e a Figura 5b mostra o Sol no dia do evento de março de 2012. *NASA STEREO mission*.

<sup>a</sup> Do inglês *Sun Earth Connection Coronal and Heliospheric Investigation e Extreme Ultraviolet Imager*

<sup>b</sup> Do inglês *Solar TERrestrial RELations Observatory Ahead*

características estruturais dinâmicas do sistema de plasma local (Ver seção 1.4 sobre o ambiente de plasma marciano) formado pela interação do vento solar e com o planeta. Quando a rotação das componentes de campo magnético de uma CME dura aproximadamente 24 horas, 8% de sua composição total é de hidrogênio e sua temperatura e densidade são menores que a do vento solar antes da sua passagem, ela é classificada como nuvem magnética [Burlaga, 1991].

Outro tipo de estruturas são as regiões de interação de corrente (SIR), que do mesmo modo que as CMEs, são estruturas onde o vento solar apresenta mudanças nos seus parâmetros. Elas surgem devido a interação entre vento solar lento e rápido no meio interplanetário, que são provenientes de diferentes regiões do Sol. Nas regiões onde o fechamento das linhas de campo magnético é próximo da superfície do Sol, surge o vento solar lento. Já o vento solar rápido surge dos chamados buracos coronais, onde o fechamento das linhas de campo não se encontra próximo da superfície solar, fazendo com que localmente as mesmas se encontrem abertas e assim o vento flui mais rapidamente.

Quando o Sol encontra-se em um período de mínimo, as regiões com buracos coronais se encontram nas regiões polares, e dessa forma o vento solar rápido surge dessas zonas, enquanto que o vento lento surge do equador. Conforme o ciclo solar transcorre, a orientação do campo magnético solar muda, fazendo com que por onde saía vento lento, saia vento rápido. Assim, conforme o Sol rotaciona, massas de plasma de diferentes velocidades fluem do Sol e interagem no meio interplanetário, formando regiões de interação entre o

vento lento e rápido. À estas estruturas da-se o nome de regiões de interação corrotante<sup>6</sup> (CIR).

A Figura 6 mostra a detecção de uma SIR pela sonda STEREO-A a 0.95 AU do Sol. Ela é caracterizada por um módulo de campo magnético perturbado e sem direção preferencial, bem como um aumento na densidade formando um choque dianteiro. A velocidade possui uma assinatura característica em forma de degrau, mostrando um aumento na velocidade (entre 500 km/s e 800 km/s). Esta estrutura apresenta também um aumento na pressão dinâmica e da temperatura em relação ao vento solar antes do evento.

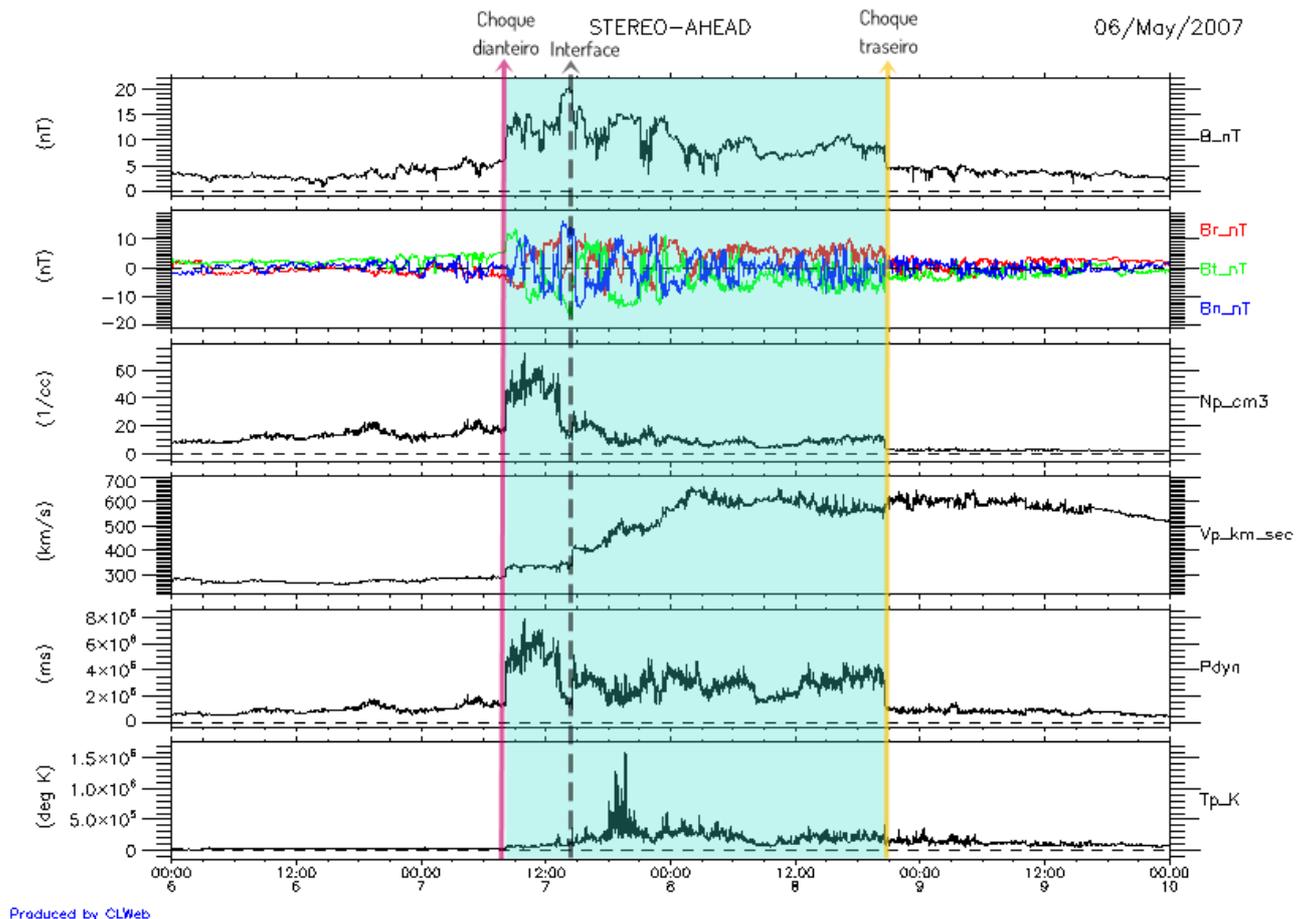


Figura 6 – Medidas dos parâmetros que descrevem uma S/CIR entre os dia 6 e 10 de maio de 2007, feitas a uma distância de aproximadamente 0.95 AU pelo observatório STEREO A. De cima para baixo, no gráfico, temos a magnitude do campo magnético em nT, as componentes do campo magnético, a densidade numérica em partículas por cm<sup>3</sup>, a magnitude da velocidade em km/s, a pressão dinâmica em dinas por centímetro quadrado e a temperatura em K. Entre as 00h00min00s UT do dia 6 de março e pouco antes das 09h00min00s UT do dia 7 de março, está o vento solar lento. Entre as 09h00min00s UT do dia 7 de março e as 21h00min00s UT do dia 9 de março, está uma S/CIR. Feito com CLWeb.

A Figura 7 mostra o esquema de uma S/CIR. Conforme o vento rápido flui do Sol, ele encontra o vento lento no meio interplanetário formando o chamado choque dianteiro

<sup>6</sup> Do inglês *Co-rotating Interaction Region*

(marcado no gráfico da Figura 6 pela linha vertical rosa). Nessa região a pressão dinâmica e a densidade do vento cresce, aumentando a temperatura. Conforme o evento avança, a velocidade aumenta e a densidade diminui, até que outra vez seja emitido vento lento da mesma região. Nesse ponto é formado o choque traseiro (marcado no gráfico da Figura 6 pela linha vertical amarela), que é a região onde o vento lento não tem pressão suficiente para empurrar o vento rápido, formando um choque traseiro. A interface entre os vento lento e rápido (interface de corrente) está indicada na mesma figura por uma linha vertical preta tracejada.

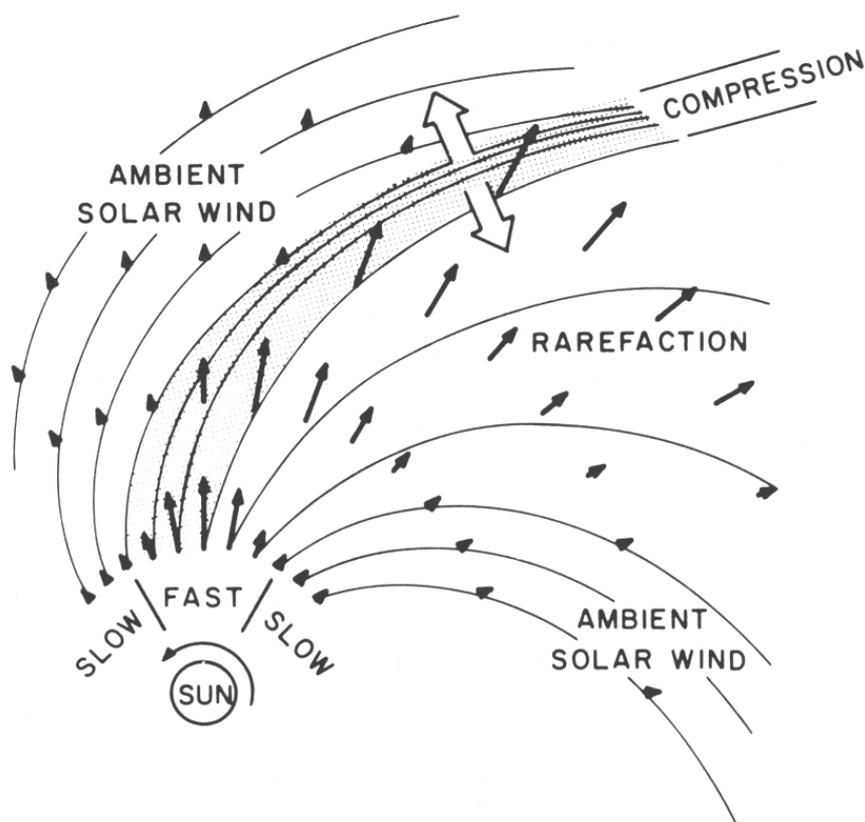


Figura 7 – Modelo esquemático da formação de uma região de interação de corrente corrotante (CIR). Retirado de Pizzo [1978].

No período de máximo, o campo magnético solar se encontra desordenado, com campos locais distribuídos na sua superfície. Assim, nesse período, os buracos coronais estão espalhados pela superfície, mudando de posição conforme a atividade solar muda, fazendo com que o vento solar rápido saia por essas regiões, e não mais preferencialmente pelos polos. O mesmo ocorre com o vento solar lento, que nesse caso surge também por regiões espalhadas no Sol onde as linhas de campo magnético são fechadas próxima a ele. Assim, as regiões de interação nesse caso se formam devido a mudança do lugar de origem dos ventos lento e rápido, pois conforme isso ocorre, a mesma região do meio interplanetário que recebia vento lento, agora passa a receber vento rápido.

## 1.4 Ambiente do Plasma Marciano

Quando um planeta possui um campo magnético próprio, diz-se que ele possui uma magnetosfera intrínseca, cuja configuração assemelha-se a um dínamo. Este é o caso da Terra, onde sua magnetosfera é formada pelo movimento do fluido presente no núcleo externo do planeta, composto em sua maior parte de ferro líquido [Lowrie, 2007]. No caso de um planeta não-magnetizado (sem uma magnetosfera própria) e com atmosfera, a magnetosfera é gerada pela interação com o vento solar. O processo ocorre principalmente através da fotoionização da exosfera do planeta devido a radiação ionizante (UV, EUV<sup>7</sup>, raios X) incidente da estrela hospedeira, formando uma camada de plasma de íons e elétrons, chamada ionosfera [Baumjohann et al., 2010, Bertucci et al., 2011]. Devido a essas cargas, a condutividade elétrica dessa região é tal que inibe a difusão do campo magnético do vento. Dessa forma, as linhas de campo se acumulam ao redor do planeta, formando uma barreira magnética. Ao sistema formado por tal estrutura da-se o nome de **magnetosfera induzida** [Bertucci et al., 2011, Kivelson, 1995, C. T. Russell, 2016, Luhmann et al., 2004].

Diferente do planeta Terra, ao invés de possuir um campo magnético dipolar, Marte tem campos locais incrustados na sua superfície, que não excedem a proporção de  $10^{-3}$  a intensidade do campo magnético terrestre. Dessa forma, Marte é considerado um planeta não-magnetizado, com uma magnetosfera induzida pela interação com o vento solar [Acuna et al., 1998]. A magnetosfera de Marte é mostrada na Figura 8. De acordo com Bertucci et al., o sistema de plasma local marciano é caracterizado por estruturas consideradas permanentes ao redor do planeta, ou seja, que estão presentes independentemente da situação do clima espacial do local. No lado voltado ao Sol está o choque de proa, seguido de uma barreira magnética e uma magnetofunda entre essas estruturas. Após a barreira está a ionosfera, e entre elas a ionopausa, que é o limite da ionosfera. No lado posterior do planeta está a magnetocauda induzida. Há ainda a barreira fotoelétrica<sup>8</sup>(PEB), que é a região que separa os elétrons perturbados da magnetofunda dos elétrons ionosféricos [Lundin et al., 2004, Bertucci et al., 2011]. A Figura 8 ilustra o sistema e as estruturas presentes ao redor do planeta.

O choque de proa forma-se quando um objeto cruza um meio com velocidade maior que a velocidade do som no mesmo, gerando uma frente de choque entre o objeto e o fluxo. Em sistemas planetários, esse arco de choque formado entre um planeta e o vento estelar chama-se choque de proa. Na parte superior da atmosfera do planeta está localizada a ionosfera. Quando um planeta tem sua atmosfera exposta a radiação ionizante, os átomos dessa camada antes neutros, são ionizados, formando então uma camada de íons chamada ionosfera. Uma vez formados, os íons carregam eletricamente tal região,

---

<sup>7</sup> *Extreme ultraviolet radiation*

<sup>8</sup> Do inglês *Photoelectron Boundary*.

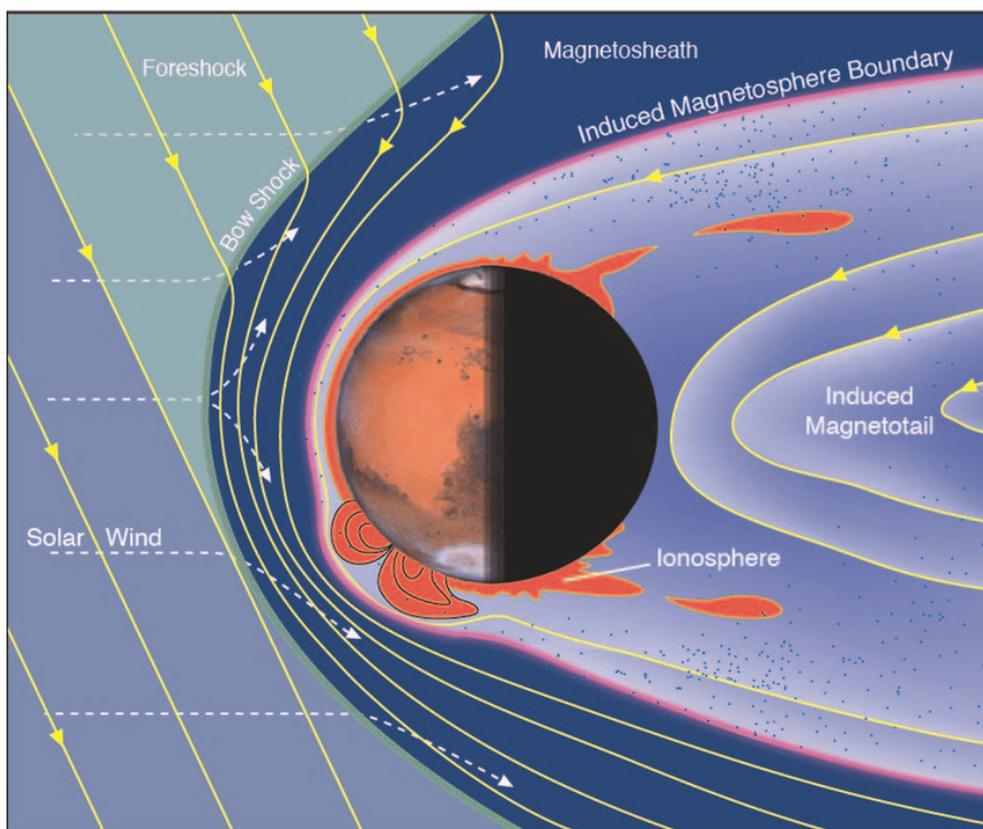


Figura 8 – Sistema local de plasma marciano, evidenciando a magnetosfera induzida de Marte e suas estruturas. Retirado de Lillis et al. [2015], cortesia de S. Bartlett.

tornando-a condutora (Figura 9), impedindo a passagem das linhas de campo magnético do vento solar pelo local. A magnetocauda induzida localiza-se no lado noite do planeta, formada por dois lóbulos com polaridade contrária e divididos por uma linha de corrente neutra. Ela é gerada devido ao efeito que o obstáculo do planeta em conjunto com ionosfera faz na forma do campo magnético interplanetário, acumulando linhas de campo na frente do planeta e curvando as linhas dentro da magnetosfera induzida (Magnetocauda), no lado noite do planeta [Bertucci et al., 2011].

Em planetas não-magnetizados e com atmosferas (como é o caso de Vênus e Marte, estudado por Bertucci et al. [2011]), ocorre um acúmulo de linhas de campo magnético do vento solar entre a magnetofunda e a ionosfera. Isso ocorre quando o ângulo entre o fluxo de partículas e a direção do campo magnético é quase perpendicular. Devido a ionosfera ser um meio condutor, o campo magnético então não consegue penetrar o planeta (Figura 9). Assim, uma barreira magnética<sup>9</sup> (IMB, que é fronteira da magnetosfera induzida) gerada pelo acúmulo de linhas de campo, se forma no ponto onde a pressão ionosférica é igual a pressão do vento solar. Assim, do lado de frente ao fluxo de vento solar é formada a barreira, enquanto que do lado junto a ionosfera é formada a ionopausa.

Entre o choque de proa e a ionopausa (região que delimita o fim da ionosfera)

<sup>9</sup> Do inglês *Induced Magnetic Boundary*

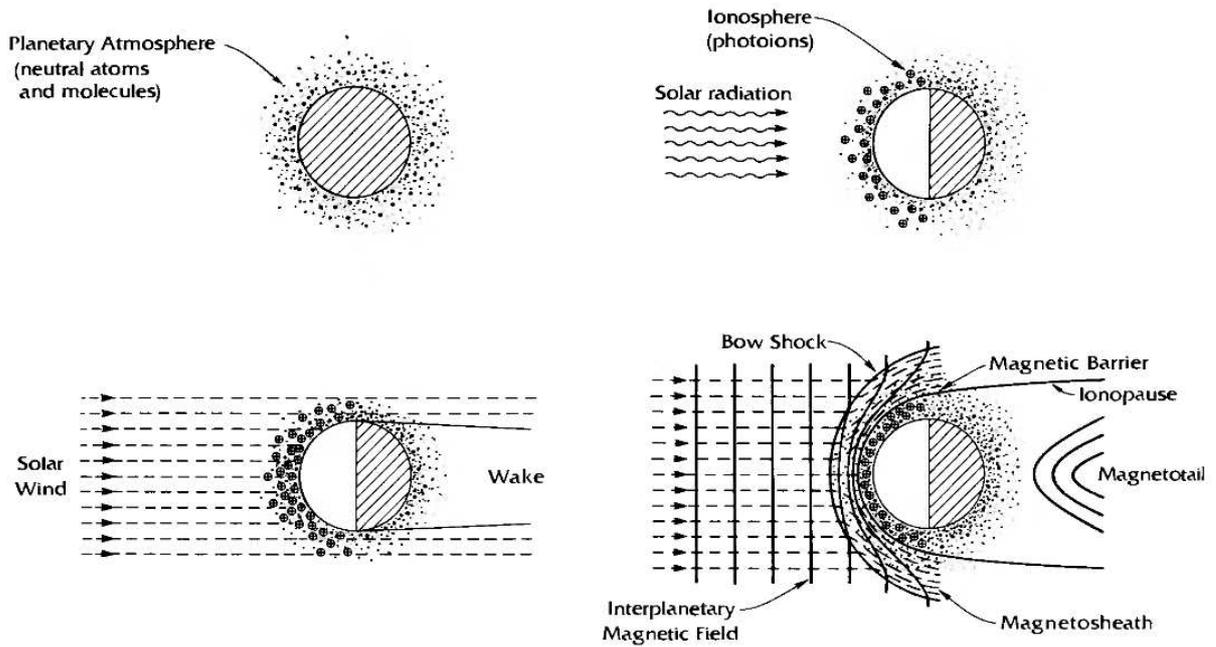


Figura 9 – Processo de formação da ionosfera de um planeta com atmosfera não-magnetizado. Retirado de [Kivelson \[1995\]](#).

está a magnetofunda, uma região perturbada pelo choque do vento solar com o obstáculo formado pelo planeta, atmosfera, ionosfera e barreira magnética do sistema. Nos dados observados pela sonda MEX, a magnetofunda está entre a assinatura do choque de proa e a ionosfera, caracterizada por uma densidade de elétrons maior que a do vento solar, com energias que variam abaixo de 1000 eV, sem um valor preferencial.

## 1.5 Objetivo e Justificativa

Neste trabalho busca-se entender o clima espacial marciano, ou seja, como o sistema de plasma marciano responde aos eventos transitórios solares em diferentes períodos do ciclo solar e compreender a dinâmica dessa região ao longo do tempo. Este trabalho busca também comparar e analisar as diferenças na configuração do sistema de plasma do planeta Marte devido a interação com duas ejeções de massa coronal, durante o período de um mínimo e um máximo solar.

A ionosfera marciana apresenta um maior enrijecimento durante o período de máximo em comparação com o período de mínimo, devido ao fluxo de radiação ionizante variar com o ciclo solar [[Lean, 1991](#)]. Isso faz com que a região apresente um grau de ionização diferente em cada período do ciclo, impedindo que o vento penetre e interaja com a região do mesmo modo que faria durante o período de mínimo [[Sánchez-Cano et al., 2016](#), [Opgenoorth et al., 2013](#)]. Desse modo, foi escolhido um evento de ICME no período de máximo em março de 2012, que atingiu o planeta quando o clima espacial local já estava previamente perturbado por outros eventos, e um evento isolado por outros eventos

anteriores e posteriores em novembro de 2007, no período de mínimo. Outro motivo é que devido a configuração do sistema solar interno nessas duas épocas, a Terra estava alinhada com Marte de forma que os eventos passavam por ambos os planetas. Assim, foi possível usar a missão ACE, que orbita a Terra, como monitor do clima espacial.

Além do estudo feito por [Sánchez-Cano et al.](#) ser o único estudo específico sobre a resposta do sistema de plasma marciano durante um mínimo, não existem estudos que usam a resposta deste sistema a um impacto de ICME isolado (ou seja, um impacto que apresente uma resposta de apenas um único evento, sem perturbações de outros eventos transitórios solares) durante o mínimo (ou seja, baixo fluxo de radiação ionizante) para comparar com outros impactos de ICME mais complexos, como é feito neste trabalho. Aqui, são comparados dois casos de impacto de ICME no sistema de plasma marciano, um durante o mínimo solar em 2007 e outro durante o máximo em 2012. O impacto de 2007 pode ser considerado um impacto isolado, já que os eventos que o precedem ocorrem muito tempo antes e o sistema está relaxado outra vez. Assim, este impacto de ICME é tomado como caso controle para o estudo.

A importância a curto prazo se dá pelo fato de que são enviadas constantemente ao planeta missões, que ficam expostas ao clima espacial local, como as sondas MAVEN<sup>10</sup> e MEX. A longo prazo, o estudo se justifica pelo fato de que Marte não possui uma magnetosfera própria como barreira contra o vento solar e eventos transitórios do Sol, fazendo com que estes interajam diretamente com a sua atmosfera, e a mesma seja erodida. Assim, entender como o clima espacial marciano é afetado por esses eventos ajuda a entender como o fenômeno da erosão atmosférica ocorre, algo relevante para a habitabilidade do planeta.

---

<sup>10</sup> Do inglês *Mars Atmosphere and Volatile Evolution mission*.

## 2 Metodologia

A metodologia deste trabalho pode ser resumida através da confecção e análise de gráficos dos dados do experimento ASPERA-3<sup>1</sup>, da sonda MEX. Tais dados estão disponíveis na plataforma CLWeb<sup>2</sup>, que também possui uma plataforma interativa que permite elaboração de gráficos dos mesmos. Concluída esta etapa, foi feita a análise dos gráficos, e a interpretação físicas dos fenômenos ali observados. Aqui são descritas a instrumentação, a configuração das órbitas da sonda utilizada, bem como os dados obtidos com os experimentos da mesma, e a configuração do sistema solar interno durante os períodos estudados.

### 2.1 Instrumentação e leitura dos dados

Neste estudo é mostrada a análise e e caracterização dos dados da sonda MEX, obtidos através do experimento ASPERA-3. O experimento possui o instrumento Espectrômetro de Elétrons<sup>3</sup> (ELS), que faz a contagem de elétrons a cada 4 s na faixa de energia de 10 eV/q a 20 keV/q. O espectrometro divide essa faixa em 128 energias logaritmicamente, com uma resolução de  $\Delta E/E = 0.08$ , resolução angular (largura total a meia altura) de  $2^\circ \times 22.5^\circ$  e campo de visão com abertura de  $4^\circ \times 360^\circ$  (dividida em 16 setores) Barabash et al. [2004].

Além do ELS, foram usados também os dados do Analisador de Massa de Íons<sup>4</sup> (IMA), que faz a contagem de íons nas faixas de 10 eV/q a 30 keV/q. O IMA tem resolução de massa para detectar íons com massa entre  $1 < m/q < \sim 80$  (como  $H^+$ ,  $He^+$  e  $O^+$ , por exemplo) e possui resolução de  $\Delta E/E = 0.07$ , resolução angular (largura total a meia altura) de  $4.5^\circ \times 22.5^\circ$  e campo de visão com abertura de  $90^\circ \times 360^\circ$  (dividida em 16 setores) Barabash et al. [2004]

A Figura 10 mostra um exemplo dos dados coletados pelo experimento ASPERA-3, usando os instrumentos ELS e IMA, entre as 17h20min00s UT e as 20h15min00s UT do dia 24 de junho de 2010. Nesta figura podemos ver que a sonda MEX sai do vento solar e entra no sistema local de plasma marciano cruzando o choque de proa as 17h35min00s UT, passa pela magnetofunda, cruzando a barreira magnética pouco antes de 18h45min00s UT, entrando na ionosfera. As 18h50min00s UT a sonda passa para o lado noite do planeta (eclipse), alcançando seu periapsis as 18h55min00s UT. Antes das 19h05min00s UT a sonda

---

<sup>1</sup> Do inglês *Analyser of Space Plasma and Energetic Atoms*.

<sup>2</sup> <http://clweb.irap.omp.eu/>, criado por Emmanuel Penou. Acessado em 05 de dezembro de 2018.

<sup>3</sup> Do inglês *ELectron Spectrometer*

<sup>4</sup> Do inglês *Ion Mass Analyzer*

entra na ionosfera, saindo aproximadamente as 19h10min00s UT ao cruzar a barreira magnética do sistema mais uma vez e entrando na magnetofunda. As 19h35min00s UT cruza o choque de proa, entrando em contato outra vez com o vento solar.

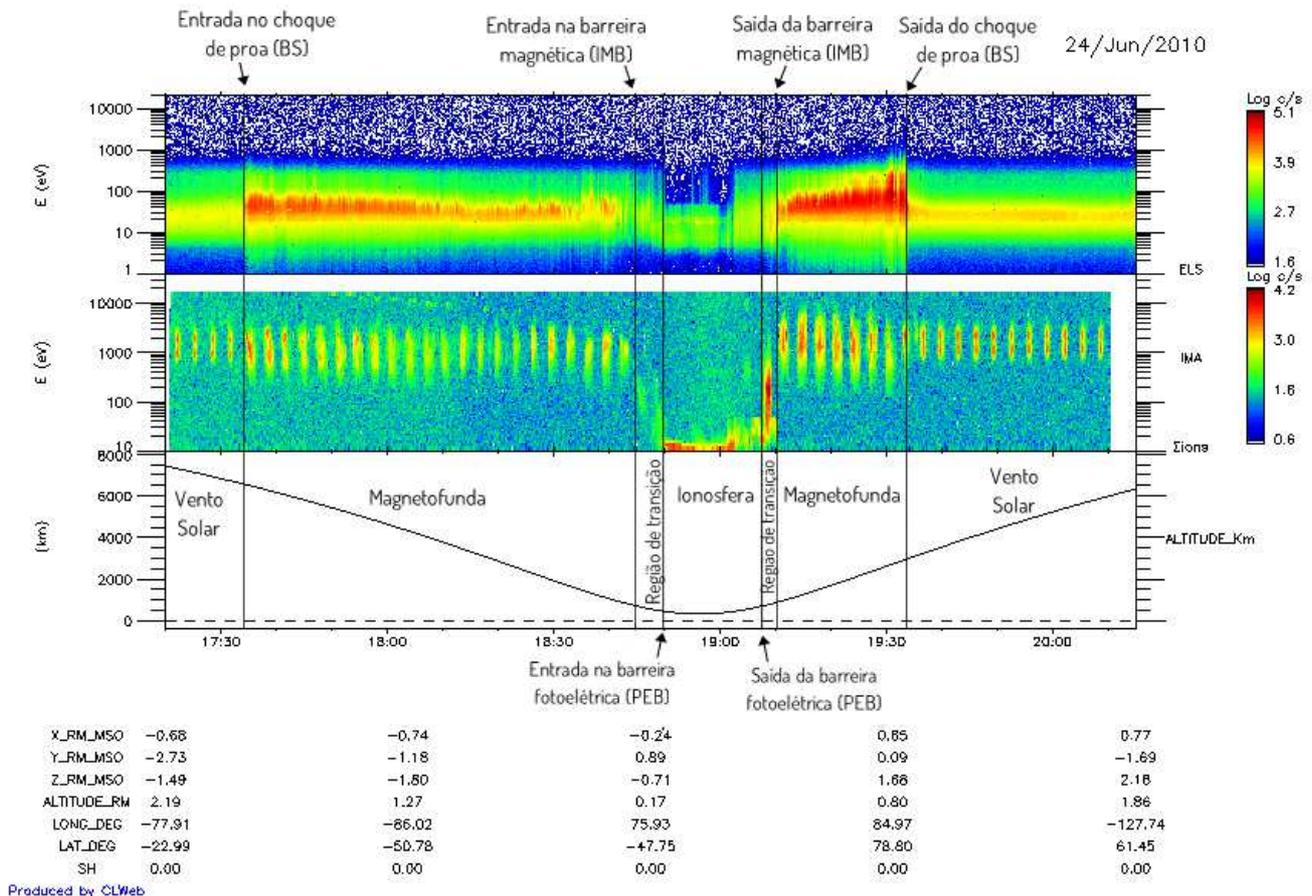


Figura 10 – Exemplo de dado registrado pelo experimento ASPERA-3, através dos instrumentos A) ELS e B) IMA. Os dois primeiros gráficos mostram, respectivamente, a contagem de elétrons e íons ( $H^+ + O^+$ ), em escala logarítmica, nas faixas de energia de 10 eV - 10 keV ao longo do tempo no dia 24 de junho de 2010. O terceiro gráfico C) mostra a altitude em km da sonda MEX do planeta Marte, com o periapsis da sua órbita indicado pela linha vertical traçada em 18h55min00s UT. No cabeçalho e rodapé da figura estão indicadas as regiões do sistema local de plasma de marciano, por onde a sonda passa ao longo da sua órbita.

## 2.2 Órbitas da MEX

A sonda MEX possui uma órbita elíptica ao redor de Marte, com periapsis a 250 km e apoapsis em 10.142 km, período orbital de 6.75 h e ângulo de inclinação de 86.35°

(quasi-polar) com relação ao equador do planeta [Chicarro et al. \[2004\]](#), [Picardi et al. \[2004\]](#). A Figura 11 mostra as órbitas da MEX entre os dias 17 e 19 de março de 2012 e os dias 21 e 24 de novembro de 2007, período de tempo em que os eventos estudados chegaram ao planeta. Nas figuras do plano YZ as órbitas da nave estão representadas por elipses em preto, enquanto que os círculos de linha tracejada e pontilhada são o limite da ionosfera (ionopausa/barreira magnética) e o choque de proa no plano terminador do sistema (ou seja, limite entre o lado dia e o lado noite do planeta,  $SZA^5 = 90^\circ$ ).

O esquema de órbita do quarto painel de ambos esquemas da Figura 11 mostra a projeção em coordenadas polares da órbitas da nave MEX. No caso de 2012, é observada uma assimetria da órbita, e por isso a nave não percorre a mesma distância em ambos lados da órbitas. Ao contrário do caso de 2007, que possui simetria, ela não permanece o mesmo tempo dentro dos dois lados das estruturas e por isso cruza o choque de proa e a barreira magnética a uma distância muito mais próxima durante o cruzamento de entrada que durante o cruzamento de saída.

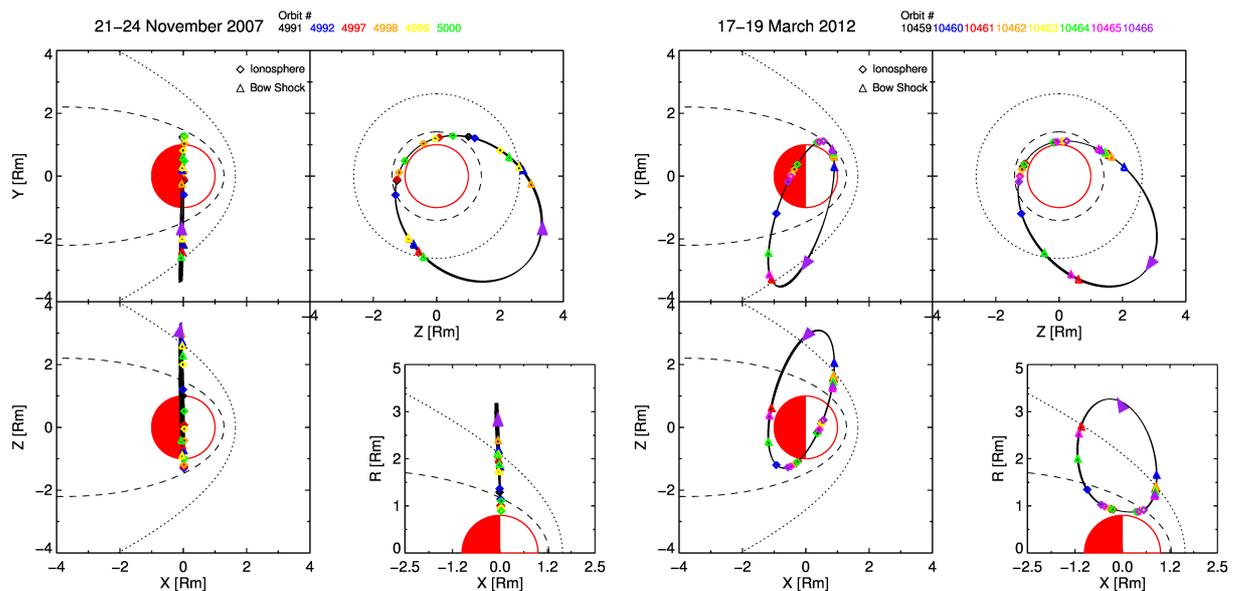


Figura 11 – Órbitas da MEX em coordenadas MSO<sup>6</sup> durante o evento de 2007 e 2012. O círculo vermelho representa o planeta Marte, onde a parte pintada em vermelho é o lado noite e em branco o lado dia (virado para o Sol) do planeta. A linha pontilhada indica a posição média do choque de proa e a linha tracejada a a posição média da barreira magnética do planeta. Os triângulos e os losangos indicam onde a nave cruzou o choque de proa e a ionosfera, respectivamente. A seta roxa indica o sentido da órbita da nave. A figura do plano YZ mostra o choque de proa e a barreira magnética no plano terminador do planeta. Cada órbita é representada por uma cor, conforme mostra o cabeçalho da figura.

<sup>5</sup> Ângulo solar zenital, ou seja, o ângulo que a nave faz com a linha do Sol de meio-dia no planeta. Quando  $SZA = 0^\circ$ , a nave está sobre esse eixo, no zênite do lado dia, quando  $SZA = 180^\circ$ , a nave está no zênite do lado noite.

<sup>6</sup> Do inglês *Mars-Solar-Orbital*

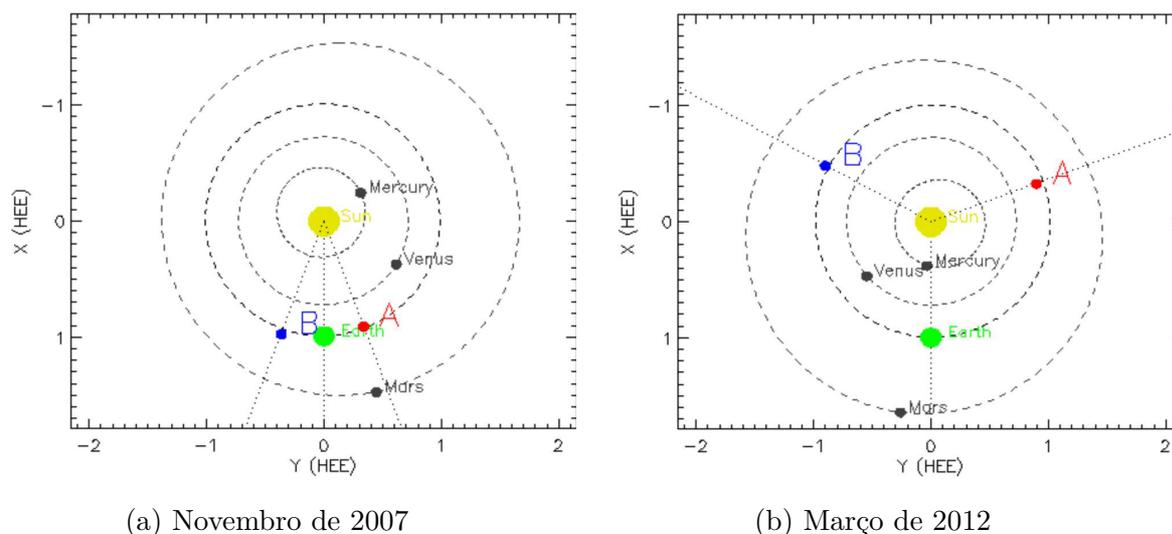


Figura 12 – Configuração do sistema solar interno durante os eventos de CME estudados em coordenadas HEE<sup>7</sup>. Em amarelo está o Sol, verde a Terra, da órbita mais interna para a externa estão Mercúrio, Vênus e Marte. Em azul está a sonda STEREO B e em vermelho a sonda STEREO A. Feito com *Stereo Science Center*.

## 2.3 Observações a 1 AU e configuração do sistema solar em Novembro de 2007 e Março de 2012

Antes de chegar em Marte os eventos transitórios solares foram registrados pela missão ACE, que monitora o vento solar no ponto de Lagrange L1 da órbita da Terra ao redor do Sol. Devido a configuração do sistema solar interno nas duas épocas estudadas, todo evento que chegava a Marte, passava aproximadamente 2 dias antes pela Terra (Figura 12), sendo detectado pelo ACE. Dessa forma, a fim de verificar o tipo de evento solar transitório que impactou Marte nos dias 22 de novembro de 2007 e 17 de março de 2012, foram também analisados os dados registrados pelo ACE.

As Figuras 13a e 13b mostram a detecção dos eventos de ICME, hachurados em amarelo, pelo ACE a uma distância de 1 AU do Sol. Em roxo, está a magnetofunda das ICMEs e o círculo laranja explicita a rotação das componentes de campo magnético dos eventos (chamado *flux rope*). Em ambas as figuras, de cima para baixo em cada gráfico estão a magnitude do campo magnético interplanetário em nT, suas componentes em coordenadas GSE<sup>8</sup>, a densidade dos prótons do vento solar em partículas por centímetro cúbico, a magnitude da velocidade em km/s, a pressão dinâmica do vento em nPa e a temperatura dos prótons em K.

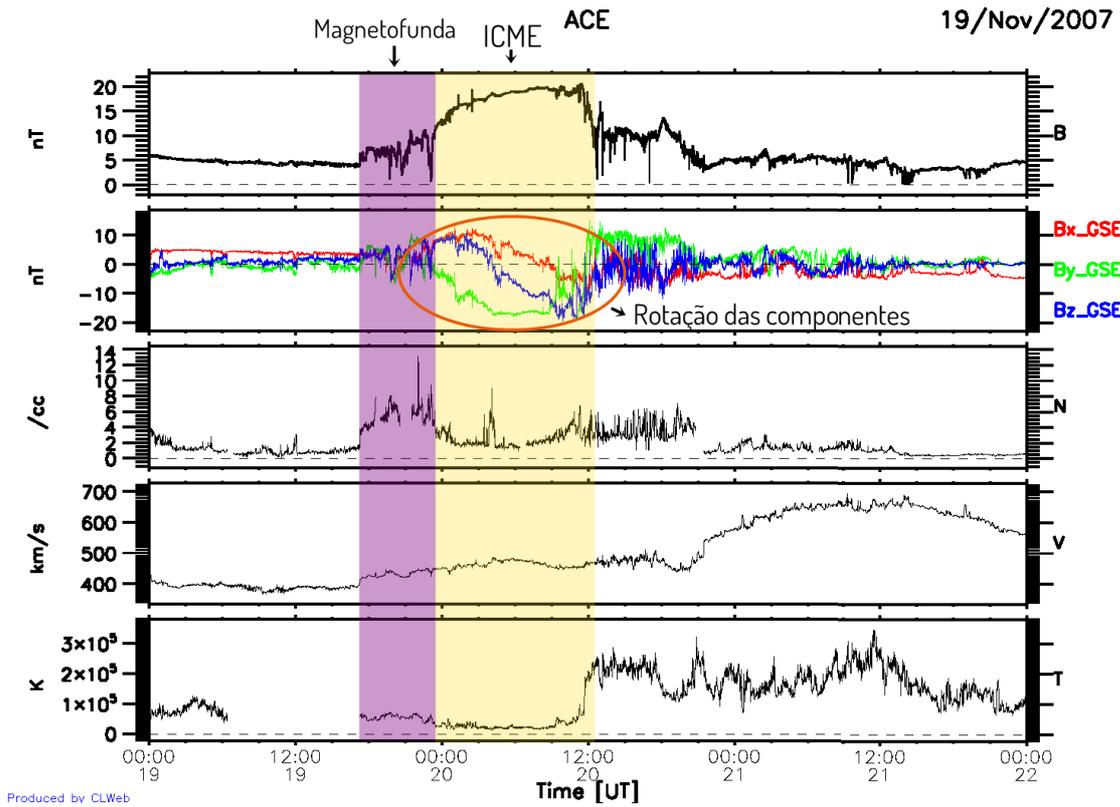
Os eventos, mostrados na Figura 13 podem ser identificados pela assinatura no

<sup>7</sup> Do inglês *Heliocentric Earth Ecliptic*

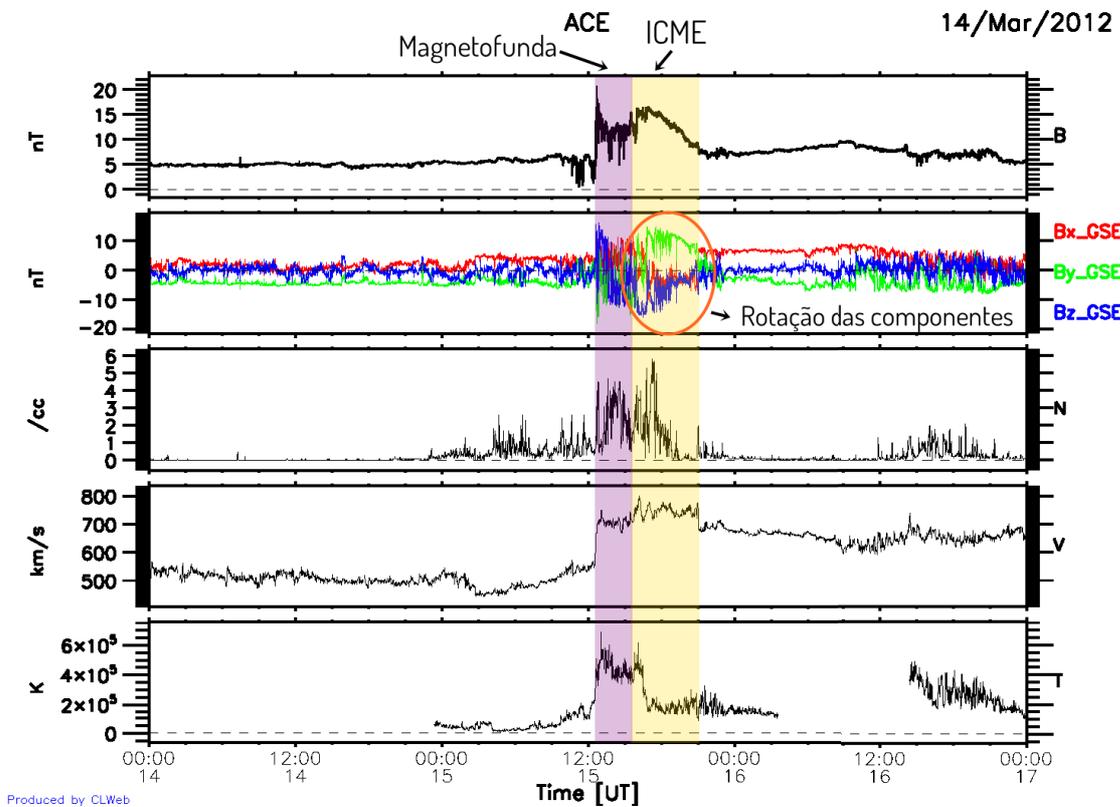
<sup>8</sup> Do inglês *Geocentric solar ecliptic*

gráfico da magnitude do campo magnético que mostra a forma de uma montanha, bem como pelo aumento na densidade do vento solar e pela rotação nas componentes do campo magnético (como descrito na sessão 1.3). Através de tal Figura, pode ser visto que o evento de 2007 durou 12 horas, enquanto que o evento de 2012 durou pouco menos de 6 horas. Nelas é possível ver que os eventos são seguidos por um vento solar rápido, sendo o evento de 2007 seguido por um fluxo mais rápido que o da ICME, enquanto que o evento de 2012 é seguido por um fluxo da mesma ordem de velocidade.

A Figura 14 mostra o clima espacial visto pelo ACE a uma distância de 1 AU do Sol. Na Figura 14a, pode ser visto que além do fluxo de radiação ionizante ser menor durante o período do evento de 2007 (ver Figura 4 na seção 1.2), a frequência de ejeções de massa coronal e C/SIRs também é menor em comparação ao período do evento de 2012, durante o máximo solar. Embora exista uma ICME que precede o evento de 22 de novembro de 2007, no dia 13 de novembro, o tempo transcorrido desde este evento até o dia 22 foi suficiente para que o sistema estivesse outra vez relaxado.

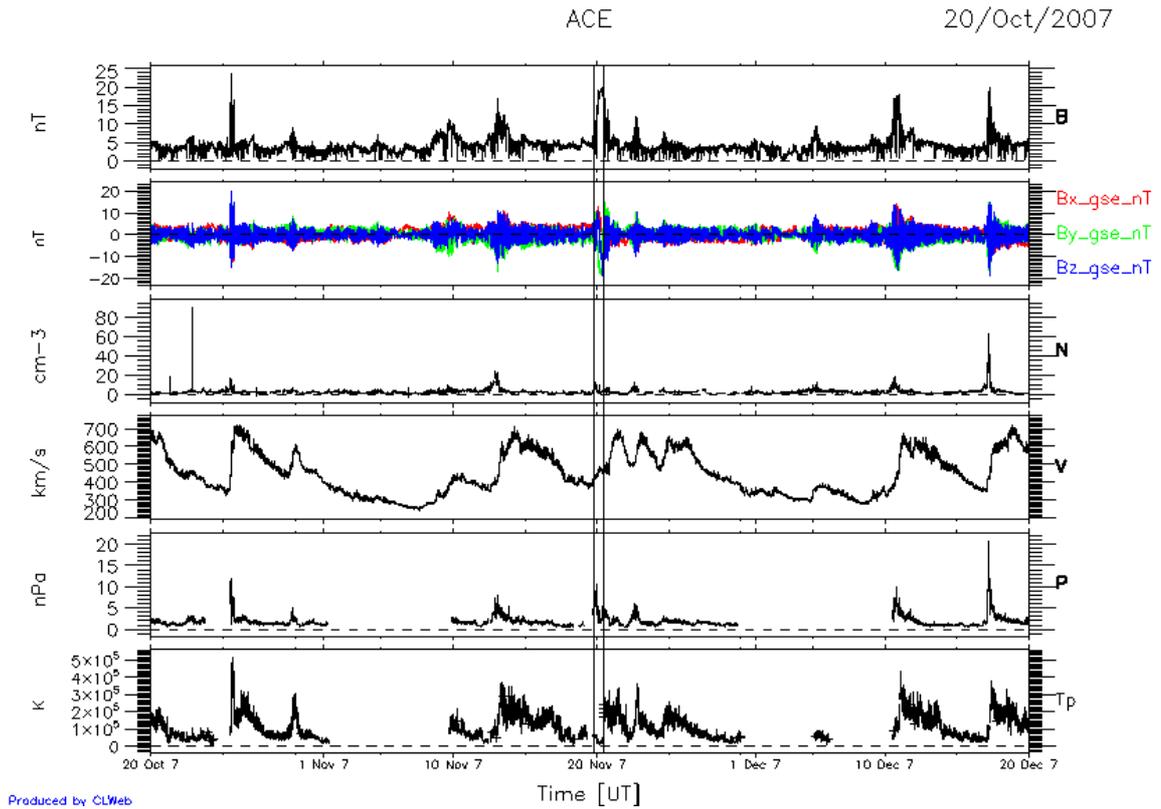


(a) Evento de novembro de 2007 registrado pela missão ACE.

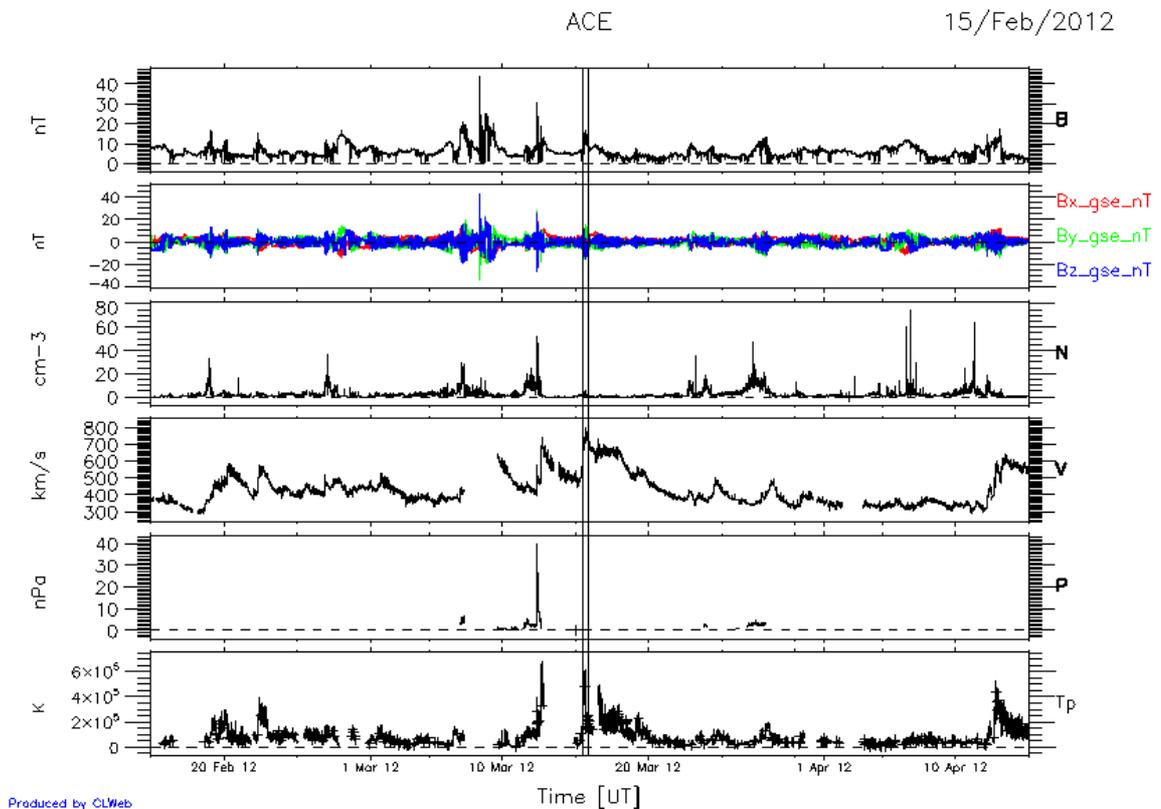


(b) Evento de março de 2012 registrado pela missão ACE.

Figura 13 – Eventos de ICME de 20 novembro de 2007 e 15 Março de 2012 hachurados em amarelo, seguidos por um vento solar rápido, observados pela missão ACE em 1 AU de distância do Sol. A magnetofunda de ambos eventos está destacada em roxo, enquanto que o círculo laranja indica o *flux rope* da ICME. Feito com CLWeb.



(a) Evento de novembro de 2007 registrado pela missão ACE.



(b) Evento de março de 2012 registrado pela missão ACE.

Figura 14 – Dados do vento solar entre 20 de outubro de 2007 e 20 de dezembro de 2007 (Figura 14a) e entre 15 de fevereiro de 2012 e 15 de abril de 2012 (Figura 14b), observados pela missão ACE em 1 AU de distância do Sol. O início e o fim dos eventos de ICME de 20 novembro de 2007 e 15 Março de 2012 estão delimitados por duas linhas verticais pretas. Feito com CIWeb.



## 3 Análise e interpretação dos eventos

### 3.1 Posição das estruturas do sistema de plasma marciano durante as ICMEs de novembro de 2007 e março de 2012

A Figura 15 mostra a projeção da órbita da sonda MEX no plano YZ (conforme explicado na Figura 11 da seção 2.2) durante o evento de 2007 (imagem da esquerda) e 2012 (imagem da direita). No esquema, vemos que a nave cruza o choque de proa (representado por triângulos) a uma distância maior do planeta durante os cruzamentos de entrada no sistema de plasma marciano que durante a saída. Entretanto, durante a órbita 5000, o choque é observado mais próximo ao planeta durante o cruzamento de entrada que durante a saída. A ionosfera (representada losangos) sofre o mesmo efeito. Para órbitas antes do impacto (4991 e 4992 em preto e azul respectivamente), a nave cruza a ionosfera antes em comparação as órbitas durante e depois o evento. A órbita 5000 mostra que o cruzamento de entrada da nave em tal região aconteceu a uma distância maior em comparação aos cruzamentos durante as órbitas 4997 e 4998, onde foi registrado o evento. Entretanto, o cruzamento de saída ocorreu a uma distância menor em comparação às mesmas órbitas.

Analogamente a órbita de 2007, a órbita de 2012 na Figura 15 mostra a projeção da órbita da sonda MEX no plano YZ. Devido a assimetria da sua órbita (como já explicado na seção 2.2, a nave passa menos tempo dentro da magnetofunda em comparação ao caso de 2007. Devido a isso, os cruzamentos pelo choque de proa ocorrem mais próximos ao planeta durante a entrada que durante os cruzamentos de saída. Observa-se que os cruzamentos pela ionosfera vão ocorrendo cada vez mais afastados do planeta entre as órbitas 10459 e 10463. Na órbita 10464 a ionosfera é observada a uma distância mais próxima ao planeta em comparação às órbitas anteriores, correspondendo assim a uma compressão na região. Nas órbitas que seguem, a região começa a relaxar e é observada mais distante do planeta outra vez.

### 3.2 Observações a 1.6 AU do impacto da ICME de 22 de Novembro de 2007

A Figura 16 mostra os dados do instrumento ELS da sonda MEX entre os dias 21 e 24 de novembro de 2007. O impacto com a ICME ocorre no dia 22 de novembro (órbita 4997, terceiro painel), entretanto faltam dados das órbitas 4993, 4994, 4995 e 4996, e não é possível saber exatamente quando ela chegou. Na órbita 4991, nota-se uma anomalia na saída da IMB. Durante e após o impacto, observa-se uma expansão da magnetofunda,

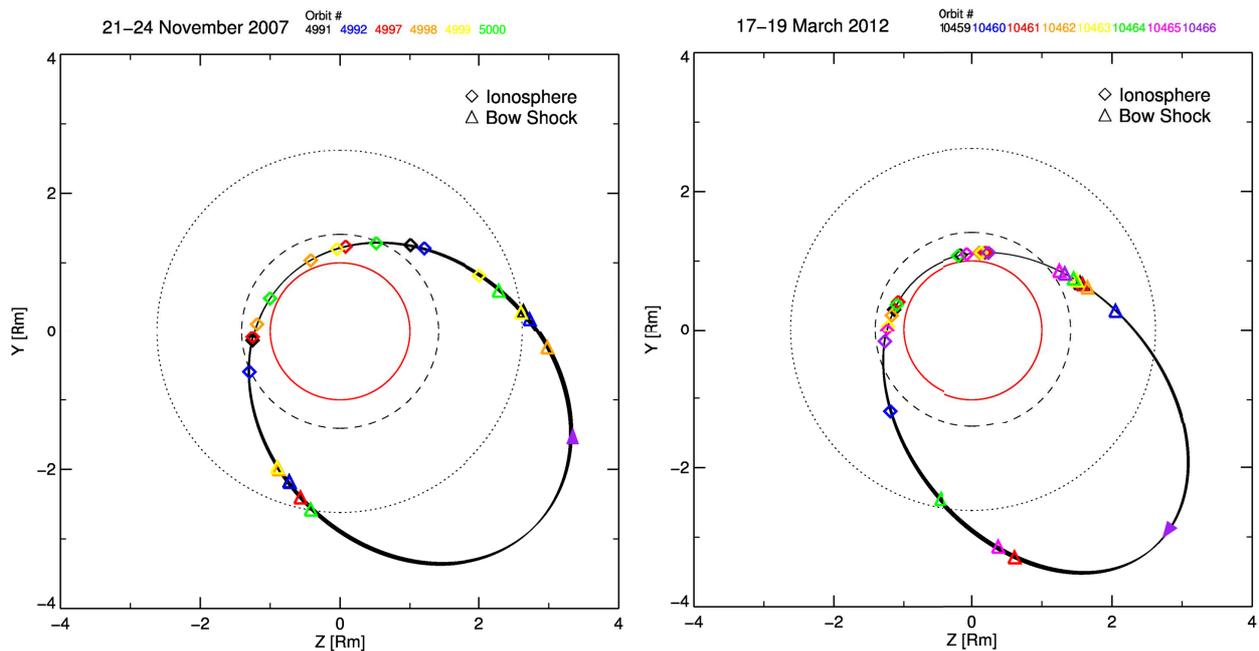


Figura 15 – Órbitas da MEX em coordenadas MSO durante o evento de 2007 (esquerda) e 2012 (direita). O círculo de borda vermelha representa o planeta Marte. A linha pontilhada indica a posição média do choque de proa e a linha tracejada a a posição média da barreira magnética do planeta. Os triângulos e os losangos indicam onde a nave cruzou o choque de proa e a ionosfera, respectivamente. O choque de proa e a barreira magnética estão representados no plano terminador do planeta. Cada órbita é representada por uma cor, conforme mostra o cabeçalho da figura.

que dura até a órbita 4999 (Quinto painel, de cima para baixo), bem como a presença de elétrons supra-termais (com energia maior que a da magnetofunda no seu estado relaxado) até a órbita 5001. Isso ocorre devido a perturbação no plasma local de tal região que o evento causa. Dentro da cavidade ionosférica observa-se ainda a presença de elétrons supra-termais nas órbitas 4992, 97, 98, 99 e 5000. Depois do impacto com a ICME, o choque de proa é cruzado pela nave mais longe do planeta, voltando a posição original apenas na órbita 4999 ( $\sim 1$  dia depois).

Na Figura 17, estão os dados do instrumento IMA da sonda MEX entre os dias 21 e 24 de novembro de 2007. Do mesmo modo que na Figura 16, o impacto da ICME já está ocorrendo no terceiro painel. A partir da órbita 4998, observa-se uma compressão da cavidade ionosférica, que dura até a órbita 5000, sugerindo uma erosão da região ionosférica, uma vez que além da ionosfera diminuir seu tamanho, íons (bem como elétrons na Figura 16) com energias acima de 20 eV são detectados na região. Da órbita 4997 em diante observa-se que a contagem de íons na magnetofunda aumenta em 1.5 ordens de grandeza em comparação com a região antes do impacto, bem como a presença de foto-íons

na ionosfera, em energias maiores que 20 eV.

### 3.3 Observações a 1.6 AU do impacto da ICME de 17 de Março de 2012

Diferente do evento de 2007, durante o mês de março de 2012, o sistema de plasma local de Marte estava continuamente perturbado por ICMEs e outros eventos solares transitório anteriores. Dessa forma, o sistema local de plasma marciano já está naturalmente perturbado mesmo antes da passagem do evento. A Figura 18 mostra os dados medidos pelo instrumento ELS a bordo da MEX, entre os dias 17 e 20 de março de 2012 (dados logo antes do dia do evento não foram colocados devido a ausência dos mesmos). Entre o dia da chegada da ICME (órbita 10459) ao sistema até a órbita 10463, a magnetofunda apresenta-se perturbada com elétrons supra-termais populando a região, e sofre uma compressão em um dos lados, ao mesmo tempo que a ionosfera se expande na órbita 10469. Nota-se também uma assimetria no tamanho da região, justificada pela forma em que a órbita da nave cruza as regiões da magnetosfera de Marte, uma vez que ela percorre um caminho maior em um dos lados da magnetosfera, permanecendo assim menos tempo dentro da magnetofunda. Os elétrons supra-termais estão presentes ainda na região de transição (entre a IMB e PEB) nas órbitas 10459, 60, 61, 62, 64, 65, 66, 67, 68 e 70, bem como dentro da cavidade ionosférica nas órbitas 10460, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67 e 70. A entrada e a saída do choque de proa é observada sem muita clareza nas órbitas do dia do impacto (10459, 60 e 61), voltando a regularidade na órbita 10464.

A Figura 19, mostra os dados medidos pelo instrumento IMA entre os dias 17 e 20 de março de 2012. A ionosfera apresenta uma compressão em comparação a resposta do evento de 2007, que dura até a órbita 10466, sofrendo uma expansão após isso ( $\sim 2$  dias depois), bem como uma contagem média de íons de  $H^+ + O^+$  1.4 ordens de menor em relação ao outro evento, com exceção das órbitas 10459, 62 e 66, que apresentam uma contagem na mesma ordem. Ainda dentro da cavidade ionosférica, observam-se foto-íons com energias entre 20 eV e 100 eV nas órbitas 10459, 64, 66 e 67, com destaque para órbita 10467, que apresenta foto-íons em energias entre 20 eV até 10 keV. Isso sugere, assim como no evento de 2007, uma erosão da região ionosférica onde a compressão e a presença de íons ou elétrons energéticos são observados ao mesmo tempo.

ASPERA-3: ELS

SZA  $\sim 75^\circ$

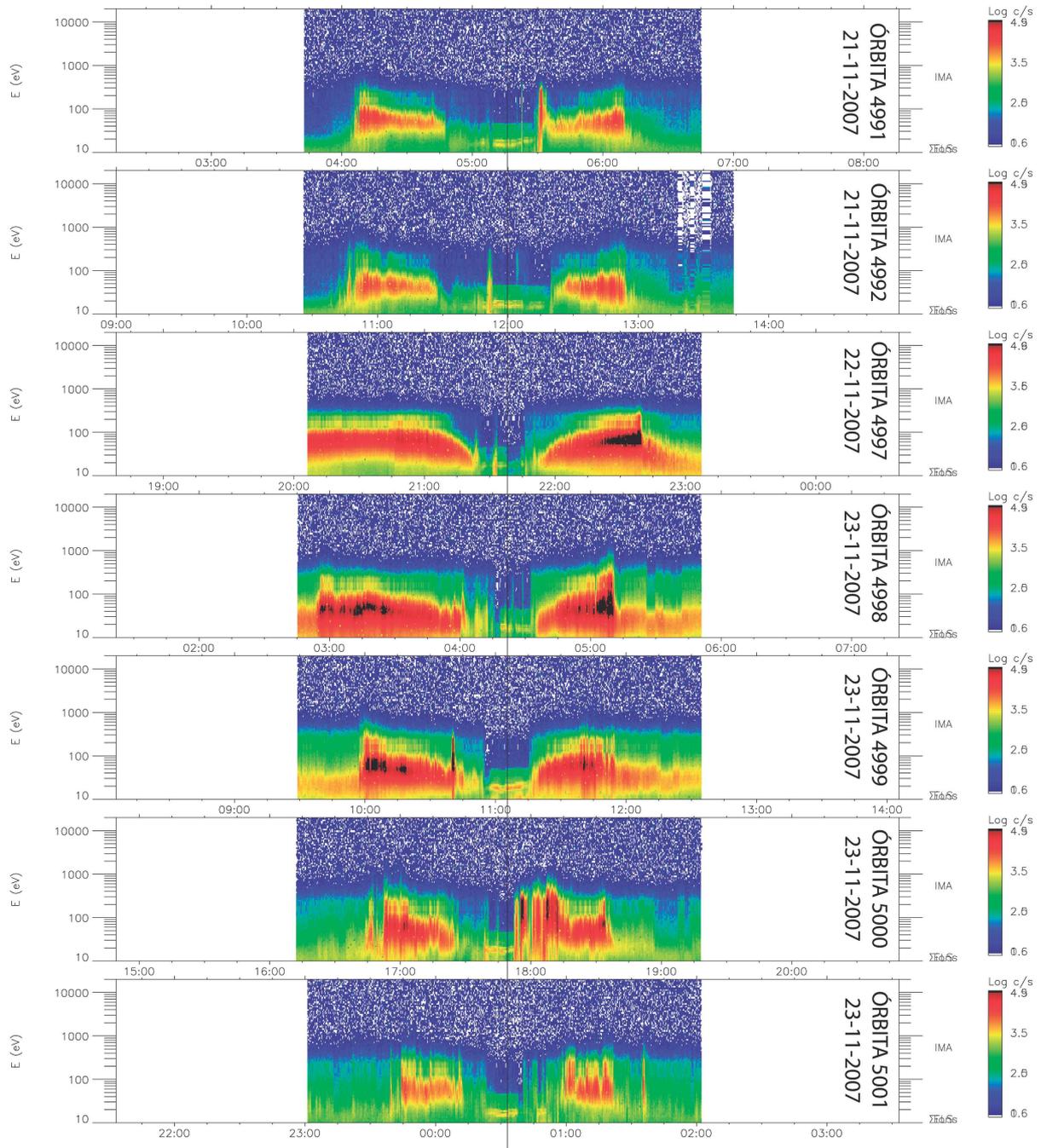


Figura 16 – Sequência de dados do instrumento ELS para o evento de novembro de 2007. Cada painel da figura mostra a contagem de elétrons na faixa de energia até  $10^4$  eV, entre os dias 21 e 23 de novembro de 2007 (De cima para baixo, os painéis mostram as órbitas 4991, 92, 97, 98, 99, 5000 e 5001), 3 horas antes e depois do periapsis de cada órbita. A linha vertical preta no centro de cada painel indica o periapsis da órbita da MEX.

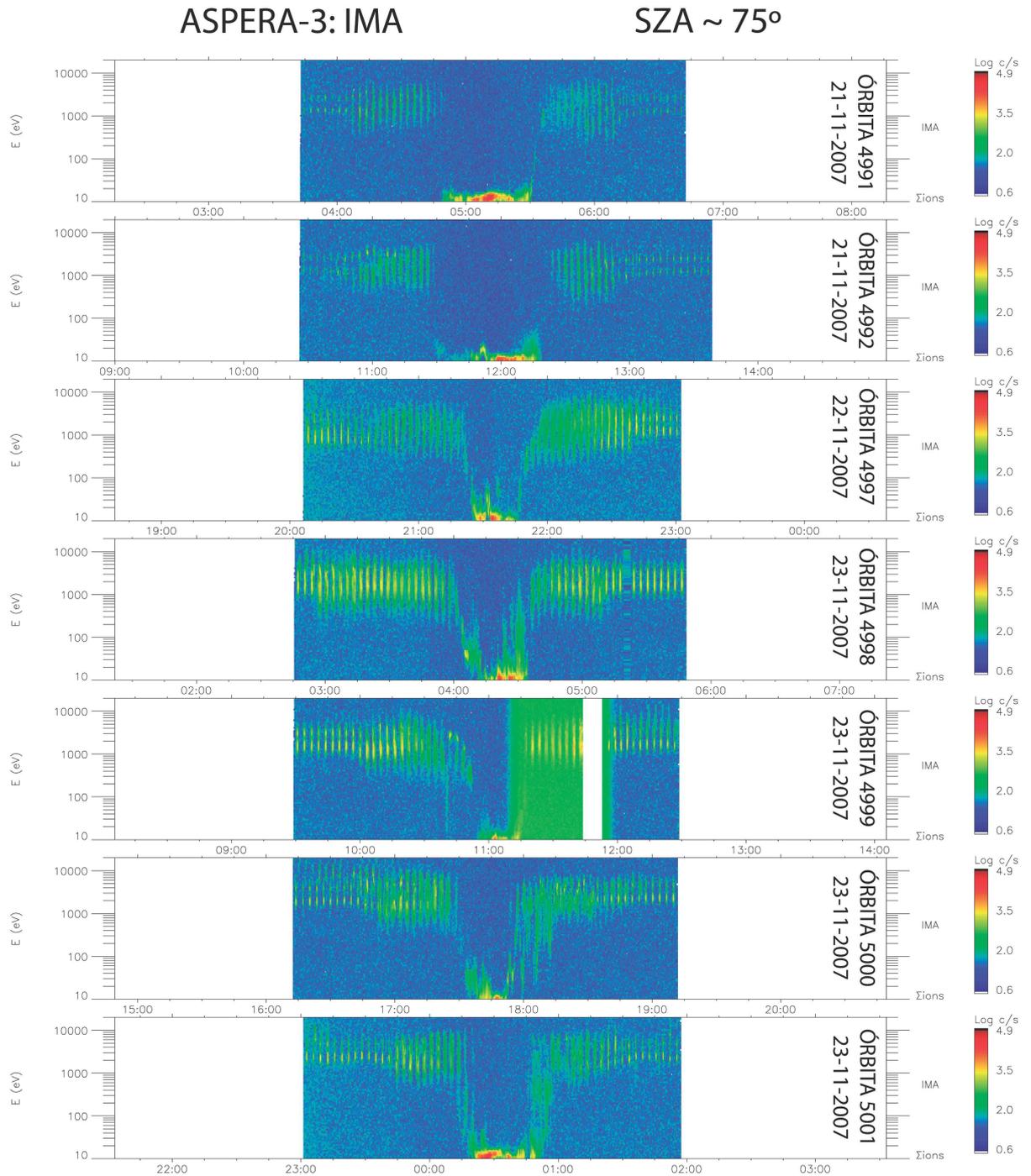


Figura 17 – Sequência de dados do instrumento IMA para o evento de novembro de 2007. Cada painel da figura mostra a contagem de íons de  $\text{H}^+ + \text{O}^+$  na faixa de energia até  $10^4$  eV, entre os dias 21 e 23 de novembro de 2007 (De cima para baixo, os painéis mostram as órbitas 4991, 92, 97, 98, 99, 5000 e 5001), 3 horas antes e depois do periapsis de cada órbita. A linha vertical preta no centro de cada painel indica o periapsis da órbita da MEX. No painel da órbita 4999, o instrumento apresenta mal funcionamento na tomada dos dados, entre as 11h10min00s UT e as 12h00min00s UT do dia 23 de novembro.

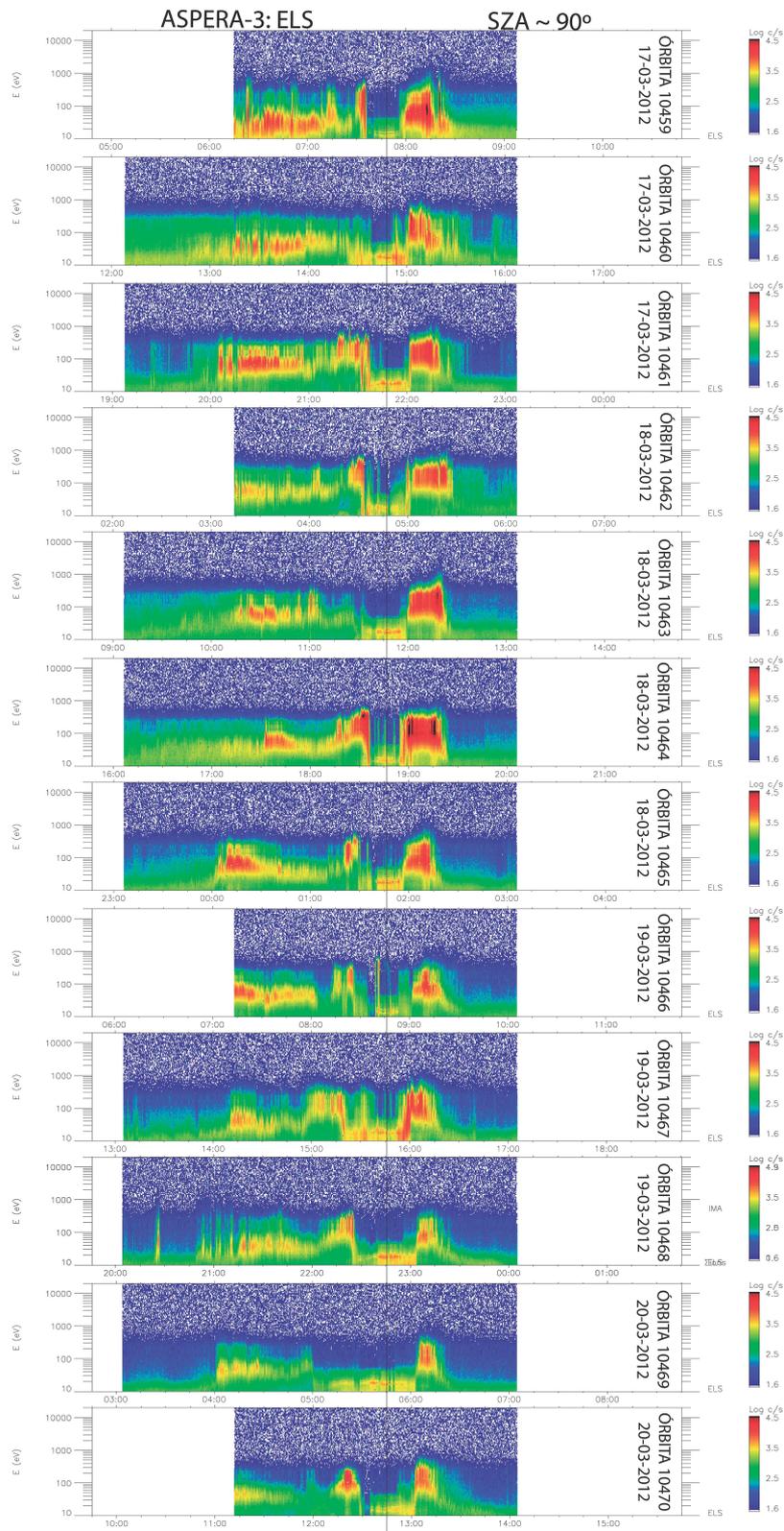


Figura 18 – Sequência de dados do instrumento ELS para o evento de março de 2012. Cada painel da figura mostra a contagem de elétrons na faixa de energia até  $10^4$  eV, entre os dias 17 e 20 de março de 2012 (De cima para baixo, os painéis mostram as órbitas 10459, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69 e 10470), 3 horas antes e depois do periapsis de cada órbita. A linha vertical preta no centro de cada painel indica o periapsis da órbita da MEX.

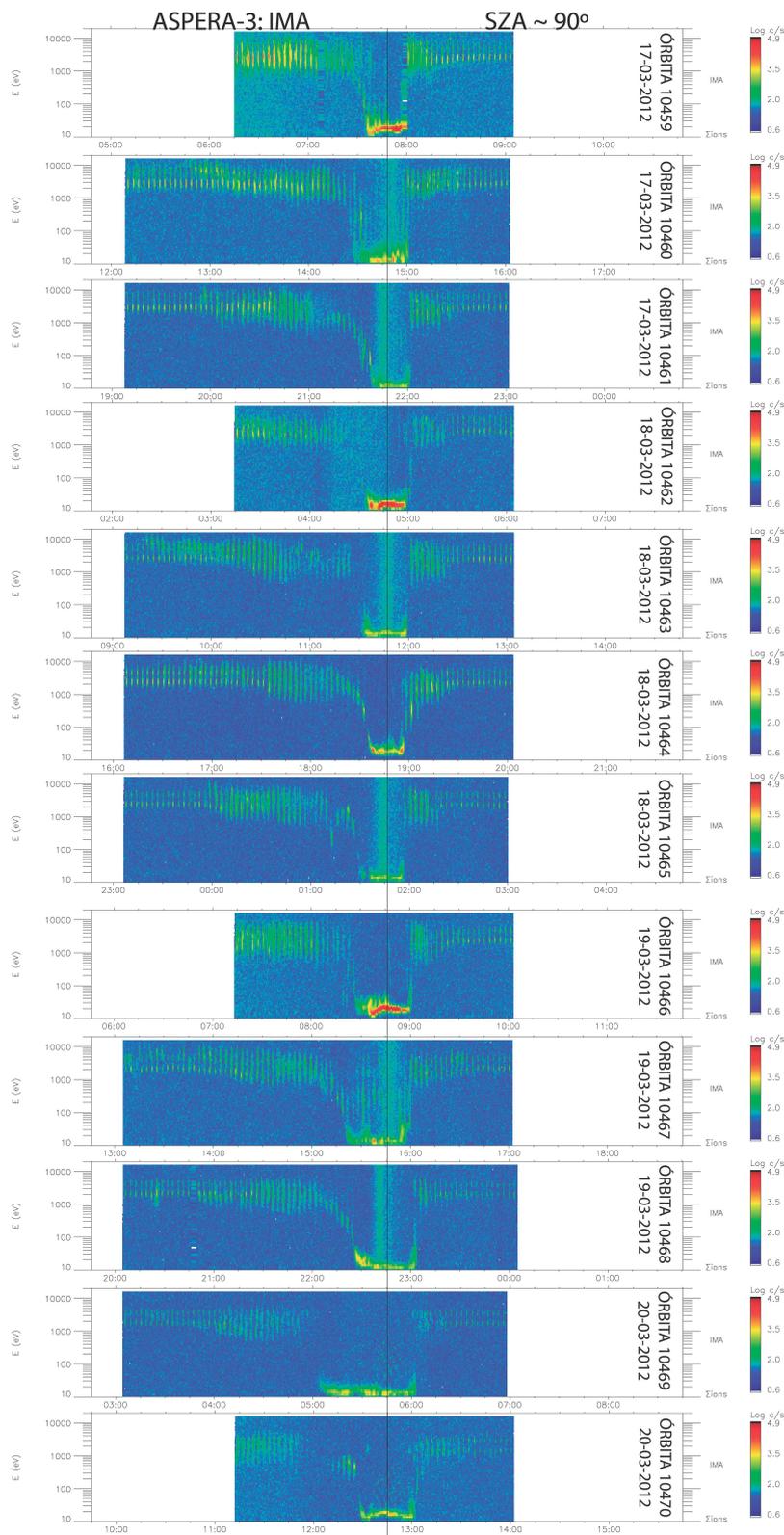


Figura 19 – Sequência de dados do instrumento IMA para o evento de março de 2012. Cada painel da figura mostra a contagem de íons de  $H^+ + O^+$  na faixa de energia de até 20 keV, entre os dias 17 e 20 de março de 2012 (De cima para baixo, os painéis mostram as órbitas 10459, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69 e 10470), 3 horas antes e depois do periapsis de cada órbita. A linha vertical preta no centro de cada painel indica o periapsis da órbita da MEX.



# 4 Conclusões

## 4.1 Resultados obtidos

Neste trabalho foram analisadas e comparadas as respostas do sistema local de plasma de Marte aos impactos de duas ICMEs durante o período de mínimo solar do ano de 2007 e o período de máximo solar do ano de 2012, usando os dados dos instrumentos ELS e IMA, do experimento ASPERA-3 que encontra-se a bordo da nave MEX.

Depois de analisar os dois impactos de ICME, observamos que a resposta do sistema local de plasma marciano é mais acentuada durante o evento de 2007, uma vez que durante o evento de 2012 o ambiente de Marte já estava perturbado por eventos anteriores devido ao período de máximo em que se encontrava com o Sol, enrijecendo assim o sistema. Este resultado está em acórdância com o estudo feito por [Sánchez-Cano et al. \[2017\]](#), que mostra que as estruturas do sistema local de plasma marciano é altamente variável às perturbações geradas por eventos transitórios solares. Podemos constatar isso ao observar o comportamento da magnetofunda durante os eventos. Durante ambos os casos, grandes fluxos de elétrons na faixa de energia de 100eV e íons de  $H^+ + O^+$  na faixa de 5 keV são observados na região após o impacto de cada ICME. Estes foram maiores no caso do ICME de novembro de 2007. A extensão da região aumenta durante o evento de 2007, enquanto que em 2012 varia pouco em relação ao mesmo período. Enquanto que durante o impacto de 2007 a região retornou ao tamanho anterior depois de 2 órbitas, em 2012 a região variou pouco até o fim das medidas, permanecendo perturbada.

Outro resultado em acordo com o estudo de [Sánchez-Cano et al. \[2017\]](#) é a compressão da ionosfera ser mais evidente no evento de 2007 que no impacto de 2012. Isso ocorre, devido a contínua interação do sistema com eventos transitórios solares e o alto fluxo de radiação ionizante do período de máximo solar, fazendo assim com que a ionosfera permaneça condutora por mais tempo, e por isso, menos variável durante o período de interação (Ou seja, a interação depende da configuração em que a ionosfera se encontra [Hall et al. \[2016\]](#)). Durante as órbitas 10462 e 10466, a ionosfera apresentou maior abundância de íons de  $H^+ + O^+$  na faixa de 10 - 20 eV de energia e na órbita 10467, é possível observar os mesmos íons na faixa de 100 eV - 10 keV, mesmo depois que o sistema deveria ter recuperado-se. Nas órbitas 4997, 98, 99 e 5000 do evento de 2007, bem como nas órbitas 10459, 60 e 64, existe a possibilidade de haver ocorrido a erosão da região ionosférica, uma vez que além da ionosfera diminuir seu tamanho, elétrons e íons com energias acima de 20 eV são detectados na região.

## 4.2 Conclusões

Através deste estudo comparativo entre um caso padrão de impacto de ICME em Marte e um caso extremo de impacto de ICME, foi observado que o sistema de plasma marciano permanece mais tempo expandido e perturbado durante o impacto de março de 2012, mas que apresenta pouca variação da posição e das características das estruturas. A contínua presença de íons mais energéticos dentro da cavidade ionosférica e magnetofunda, bem como uma maior quantidade destes nos dados de 2012 que em 2007, mostram que estas regiões apresentaram maior taxa de ionização.

Durante o impacto da ICME de 2007, no período de mínimo solar, o sistema de plasma marciano apresenta uma variação acentuada da posição e das características das estruturas (resultado este observado também por [Sánchez-Cano et al. \[2017\]](#)), onde a quantidade de elétrons e íons supra-termais observados na magnetofunda e ionosfera aumenta durante o impacto.

## 4.3 Trabalho em andamento

Atualmente, estão sendo escritos dois artigos, um sobre o presente tema e outro abordando o caso de novembro de 2007, analisado neste estudo. Para compor tais trabalhos, estão sendo usados os dados de densidade numérica eletrônica da ionosfera por  $\text{cm}^3$  do instrumento AIS<sup>1</sup>. O instrumento faz parte do radar MARSIS<sup>2</sup>, que está à bordo da MEX.

Com tais dados, é possível definir quando a ionosfera sofre apenas compressão ou também uma erosão de suas camadas. Isso por que no primeiro caso observaríamos um aumento na densidade e diminuição do tamanho da região, enquanto que no segundo, seria observada uma diminuição dessa região, sem aumento na densidade e junto a íons e elétrons acelerados (com alta energia).

---

<sup>1</sup> Do inglês *Active Ionospheric Sounding*

<sup>2</sup> Do inglês *Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionospheric Sounding*.

# Referências

- Nicole Meyer-Vernet. *Basics of the solar wind*. Cambridge University Press, 2007. Citado 3 vezes nas páginas 15, 28 e 29.
- V Pizzo. A three-dimensional model of corotating streams in the solar wind, 1. theoretical foundations. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 83(A12):5563–5572, 1978. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 34.
- Robert J Lillis, David A Brain, Stephen W Bougher, François Leblanc, Janet G Luhmann, Bruce M Jakosky, Ronan Modolo, J Fox, J Deighan, Xiaohua Fang, et al. Characterizing atmospheric escape from mars today and through time, with maven. *Space Science Reviews*, 195(1-4):357–422, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 36.
- Atmo Kivelson. *Introduction to space physics*. Cambridge university press, 1995. Citado 5 vezes nas páginas 16, 19, 28, 35 e 37.
- DD Morgan, Catherine Dieval, DA Gurnett, Firdevs Duru, EM Dubinin, Markus Fraenz, DJ Andrews, HJ Opgenoorth, D Uluşen, Igor Mitrofanov, et al. Effects of a strong icme on the martian ionosphere as detected by mars express and mars odyssey. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 119(7):5891–5908, 2014. Citado na página 27.
- Hermann J Opgenoorth, David J Andrews, M Fränz, Mark Lester, NJT Edberg, D Morgan, F Duru, O Witasse, and AO Williams. Mars ionospheric response to solar wind variability. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 118(10):6558–6587, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 37.
- Beatriz Sánchez-Cano, BES Hall, M Lester, ML Mays, O Witasse, R Ambrosi, D Andrews, M Cartacci, A Cicchetti, M Holmström, et al. Mars plasma system response to solar wind disturbances during solar minimum. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 122(6):6611–6634, 2017. Citado 4 vezes nas páginas 27, 38, 55 e 56.
- Judith Lean. Variations in the sun’s radiative output. *Reviews of Geophysics*, 29(4): 505–535, 1991. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 37.
- Leonard FE Burlaga. Magnetic clouds. In *Physics of the Inner Heliosphere II*, pages 1–22. Springer, 1991. Citado na página 32.
- William Lowrie. *Fundamentals of geophysics*. Cambridge university press, 2007. Citado na página 35.

- Wolfgang Baumjohann, Michel Blanc, Andrei Fedorov, and Karl-Heinz Glassmeier. Current systems in planetary magnetospheres and ionospheres. *Space science reviews*, 152(1-4): 99–134, 2010. Citado na página 35.
- C Bertucci, F Duru, N Edberg, M Fraenz, C Martinecz, K Szego, and O Vaisberg. The induced magnetospheres of mars, venus, and titan. *Space science reviews*, 162(1-4): 113–171, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 36.
- R. J. Strangeway C. T. Russell, J. G. Luhmann. *Space Physics: An Introduction*. Cambridge university press, 2016. Citado na página 35.
- JG Luhmann, SA Ledvina, and CT Russell. Induced magnetospheres. *Advances in Space Research*, 33(11):1905–1912, 2004. Citado na página 35.
- MH Acuna, JEP Connerney, P aa Wasilewski, RP Lin, KA Anderson, CW Carlson, J McFadden, DW Curtis, D Mitchell, H Reme, et al. Magnetic field and plasma observations at mars: Initial results of the mars global surveyor mission. *Science*, 279 (5357):1676–1680, 1998. Citado na página 35.
- R Lundin, S Barabash, H Andersson, M Holmström, A Grigoriev, M Yamauchi, J-A Sauvaud, A Fedorov, E Budnik, J-J Thocaven, et al. Solar wind-induced atmospheric erosion at mars: First results from aspera-3 on mars express. *science*, 305(5692):1933–1936, 2004. Citado na página 35.
- Beatriz Sánchez-Cano, Mark Lester, O Witasse, Stephen E Milan, BES Hall, M Cartacci, K Peter, DD Morgan, P-L Blelly, S Radicella, et al. Solar cycle variations in the ionosphere of mars as seen by multiple mars express data sets. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 121(3):2547–2568, 2016. Citado na página 37.
- S Barabash, R Lundin, H Andersson, J Gimholt, M Holmström, O Norberg, M Yamauchi, K Asamura, AJ Coates, DR Linder, et al. Aspera-3: analyser of space plasmas and energetic ions for mars express. In *Mars Express: The Scientific Payload*, volume 1240, pages 121–139, 2004. Citado na página 39.
- Augustin Chicarro, Patrick Martin, and R Trautner. The mars express mission: an overview. In *Mars Express: The Scientific Payload*, volume 1240, pages 3–13, 2004. Citado na página 41.
- G Picardi et al. Mars express: A european mission to the red planet, sp-1240. *ESA Publication Division, Noordwijk, Netherlands*, pages 51–70, 2004. Citado na página 41.
- Benjamin Edward Stanley Hall, Mark Lester, Jonathan D Nichols, Beatriz Sánchez-Cano, David J Andrews, Hermann J Opgenoorth, and Markus Fraenz. A survey of superthermal electron flux depressions, or “electron holes,” within the illuminated martian induced

magnetosphere. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 121(5):4835–4857, 2016.  
Citado na página 55.