

Rafael Faria Santana

**Estudo correlacional entre os parâmetros do
meio interplanetário e o índice geomagnético
equatorial durante tempestades magnéticas
intensas do ciclo solar 24**

Lorena, São Paulo, Brasil

2021

Rafael Faria Santana

Estudo correlacional entre os parâmetros do meio interplanetário e o índice geomagnético equatorial durante tempestades magnéticas intensas do ciclo solar 24

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Escola de Engenharia de Lorena – Universidade de São Paulo como requisito parcial para conclusão da Graduação do curso de Engenharia Física.

Universidade de São Paulo – USP

Escola de Engenharia de Lorena

Engenharia Física

Orientador: Dr. Marcos Vinicius Dias Silveira

Lorena, São Paulo, Brasil

2021

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha Catalográfica

EEL USP

Faria Santana, Rafael

Estudo correlacional entre os parâmetros do meio interplanetário e o índice geomagnético equatorial durante tempestades magnéticas intensas do ciclo solar 24 / Rafael Faria Santana; Marcos Vinicius Dias Silveira. -- Lorena, 2021
f.:27

Monografia (Projeto Integrado em Engenharia Física) - Escola de Engenharia de Lorena - Universidade de São Paulo.

1.Vento Solar 2.Sol 3.Magnetosfera 4.Plasma

CDU

Rafael Faria Santana

Estudo correlacional entre os parâmetros do meio interplanetário e o índice geomagnético equatorial durante tempestades magnéticas intensas do ciclo solar 24

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Escola de Engenharia de Lorena – Universidade de São Paulo como requisito parcial para conclusão da Graduação do curso de Engenharia Física.

Trabalho aprovado. Lorena, São Paulo, Brasil, 10 de dezembro de 2021:

Dr. Marcos Vinicius Dias Silveira
Orientador

Prof. Dra. Flavia Reis Cardoso Rojas
Convidado1

Dr. Luis Eduardo Antunes Vieira
Convidado 2

Lorena, São Paulo, Brasil
2021

Agradecimentos

Primeiramente gostaria de agradecer aos meus pais, Andrea e Luciano, que sempre fizeram de tudo visando a minha educação. Todas as minhas conquistas são, antes de mais nada, fruto de muito trabalho e dedicação deles.

Também gostaria de agradecer aos meus amigos e colegas, tanto da EEL quanto de fora, pelo suporte durante a execução deste projeto assim como durante toda a minha vida acadêmica. Aos amigos mais próximos, esse pequeno agradecimento é pouco para a importância de vocês nessa conclusão.

Quero agradecer aos professores, funcionários e todos os profissionais que de alguma forma cruzaram caminhos comigo durante a minha graduação. Em especial, agradeço à Prof^a. Dr^a. Flavia por desde 2017, no início da minha graduação, me orientar em diversas ocasiões, me dar a oportunidade de trabalhar no INPE e, não menos importante, ter grande papel na orientação desse trabalho. Agradeço aos profissionais do INPE que me receberam entre os anos de 2017 e 2019 e me ensinaram muito mais do que eu poderia imaginar, em especial ao Dr. Luis Eduardo e ao Dr. Renato que me orientaram durante a iniciação científica.

Também agradeço ao Dr. Marcos Vinicius, a quem eu conheci tem pouco mais de 6 meses, e sem pestanejar topou me orientar neste trabalho, sendo super solícito e tendo imensa ajuda e participação. E com quem, assim como a Flavia e o Luis, espero manter contato após a graduação.

Por fim, mas não menos importante, agradeço ao meu cachorro, Mayllon, que durante os 16 anos que eu o conheço me viu sair do ensino fundamental I para o ensino fundamental II, do ensino fundamental II para o ensino médio, do ensino médio para a faculdade e agora o término da minha graduação, sempre do meu lado, e no caso da confecção deste trabalho, muitas vezes literalmente.

*"O universo não parece ser
nem benevolente nem hostil,
apenas indiferente às
preocupações de criaturas
tão insignificantes como
nós." Carl Sagan*

Resumo

A fim de entender o funcionamento de tempestades magnéticas intensas foi desenvolvido um estudo para identificação de correlações entre a estrutura do vento solar, desde sua origem até as medições dos índices magnéticos na superfície da Terra. Foram analisados diversos parâmetros do meio interplanetário, tais como, intensidade e o vetor campo magnético, velocidade e densidade do plasma do vento solar durante as 22 tempestades magnéticas intensas ($\text{SYM-H} < -100nT$) do ciclo solar 24. Para obter-se uma análise quantitativa do acoplamento entre as estruturas do meio interplanetário e o campo magnético terrestre, foi estudada a correlação entre a componente B_z do campo magnético interplanetário e o índice geomagnético SYM-H. Através de correlação simples e correlação cruzada foi concluído a forte dependência da intensidade magnética das tempestades analisadas com a componente B_z do meio interplanetário, tanto para as curvas com suavização de pontos, quanto para as sem suavização de altas frequências, com $r = 0,43$ e $r = 0,48$ respectivamente para correlação simples, e $r = 0,75$ e $r = 0,79$ respectivamente para correlação cruzada, indicando um atraso existente esperado entre as curvas de B_z e SYM-H. Porém para as demais propriedades não foram identificados valores de correlação forte, o que é discutido no decorrer deste trabalho. As estruturas solares relacionadas às perturbações também foram analisadas a fim de entender o efeito destas na geração e comportamento das tempestades, notando que a grande maioria das tempestades magnéticas intensas teve relação com ejeções de massa coronal (CME) e não feixes de alta velocidade (HSS).

Palavras-chaves: Tempestades magnéticas. Ciclo solar 24. Magnetosfera.

Abstract

In order to understand intense magnetic storms' behaviour, it was developed a study aiming the identification of correlations between the solar wind structure and geomagnetic indexes on the Earth surface. There were analysed several interplanetary parameters, such as magnetic field intensity and its components, solar wind speed and plasma density during 22 intense magnetic storms ($\text{SYM-H} < -100nT$) of the solar cycle 24. Intending to obtain a qualitative analysis of interplanetary structures coupling and the Earth's magnetic field, the correlation between the component Bz of the interplanetary magnetic field and the geomagnetic index SYM-H was explored. Through Pearson Correlation and Cross-correlation methods the strong dependence of storms magnetic intensity and Bz was observed. Results show that for smooth high frequency and non-smooth high frequency data curves $r = 0,43$ and $r = 0,48$ respectively for Pearson correlation, and $r = 0,75$ and $r = 0,79$ respectively for cross-correlation, showing an expected delay between the two curves. Notwithstanding, for the other study properties a strong correlation was not identified, which is discussed furthermore in this research. The solar structures related to the magnetic disturbances were also analysed in order to understand its effects on the generation and behaviour of magnetic storms, noticing that the majority of intense magnetic storms were associated with Coronal Mass Ejections (CMEs) and not High-Speed Streams (HSSs).

Magnetic storms. Solar Cycle 24. Magnetosphere:

Lista de ilustrações

Figura 1 – Rotação diferenciada do Sol, ou seja, a região equatorial solar gira em torno do eixo de rotação do Sol com velocidade maior do que as regiões de altas latitudes. As linhas em magenta representam o campo magnético abaixo da superfície visível. Observa-se que as linhas do campo magnético vão se entrelaçando a medida que o ciclo solar avança no tempo.	28
Figura 2 – Os dois painéis superiores mostram o número de manchas solares dos ciclos 21 ao 24 (de 1974 a 2019). O mais abaixo mostra todo o período em que se tem medidas, de 1750 a 2021.	29
Figura 3 – Mancha solar do dia 06/11/1998 capturada pelo SOHO	30
Figura 4 – Evolução temporal da posição em latitude solar das manchas, de 1870 a 2020.	30
Figura 5 – Imagem ilustrativa das camadas solares	31
Figura 6 – Imagem da SDO (211Å) do dia 11/07/2021 com buraco coronal.	32
Figura 7 – Diagrama mostrando o sistemas de coordenadas GSM	34
Figura 8 – Parâmetros do vento solar (B_z , B_y , V_x , densidade e clock angle) que causaram a tempestade magnética registrada pelo índice SYM-H em janeiro de 2015.	35
Figura 9 – Diagrama esquemática da magnetosfera terrestre. Na Figura é possível observar a incidência do vento solar, assim como a corrente anelar.	36
Figura 10 – Mapa das localizações dos quatro observatórios do índice DST	37
Figura 11 – Mapa das localizações dos observatórios do índice SYM-H	38
Figura 12 – Fases de uma tempestade magnética. Da esquerda para direita, progredindo no tempo, a fase de SSC, fase inicial, fase principal e fase de recuperação, em relação ao índice DST.	39
Figura 13 – Índice SYM-H do mês de março de 2015. Eixo vertical representa a intensidade das medições do índice SYM-H. Eixo horizontal representa o período de tempo descrito.	43
Figura 14 – Propriedades analisadas nos dois períodos para a tempestade de 09/10/2012 - Evento 8. De cima para baixo: SYM-H em nT, B_z em nT, B_y em nT, V_x em km/s, densidade de prótons em cm^3 , clock angle em graus. Esq.: Período mais longo estudado. Dir.: Período mais curto estudado.	44
Figura 15 – Índice SYM-H para tempestade do dia de São Patrício, variando de 16/03/2015 às 00:00 até 19/03/2015 às 00:00. A figura mostra a intensidade da perturbação magnética no Eixo vertical, pelo período de tempo estudado.	45

Figura 16 – Índice SYM-H para tempestade de junho de 2013, variando de 31/05/2013 às 00:00 até 03/06/2013 às 00:00. A figura mostra a intensidade da perturbação magnética no Eixo vertical, pelo período de tempo estudado.	46
Figura 17 – Índice SYM-H para tempestade de maio de 2017, variando de 27/05/2017 às 00:00 até 30/05/2017 às 00:00. A figura mostra a intensidade da perturbação magnética no Eixo vertical, pelo período de tempo estudado.	46
Figura 18 – Índice SYM-H original e suavizado, respectivamente.	48
Figura 19 – Gráfico de número de manchas solares por dia (eixo horizontal) entre dezembro de 2008 e novembro de 2019 (cinza) e tempestades com índice SYM-H $\geq -100nT$ no mesmo período, identificados por triângulos laranjas	52
Figura 20 – Gráfico de manchas solares no ciclo 24. Eixo vertical representa a quantidade de manchas solares, eixo horizontal o período de tempo do ciclo solar estudado. A linha roxa é a linha de valores suavizados, já a preta e os pontos mostram o número total de manchas mensais	52
Figura 21 – Gráficos de SYM-H e Bz, respectivamente, das tempestades 3 e 4. Demonstrando a intensidade de ambos dentro do período de tempo analisado para cada evento.	54
Figura 22 – Gráfico de SYM-H da tempestades 3 de outubro de 2011, com pico mínimo em 25/10/2011.	55
Figura 23 – Gráfico de dispersão e valor do coeficiente de correlação simples entre os valores mínimos de SYM-H (eixo vertical) e os valores máximos de, respectivamente de cima para baixo, campo magnético interplanetário total, densidade de prótons e componente x da velocidade, para todas as 22 tempestades estudadas.	57
Figura 24 – Figura ilustrativa de comparação de pontos com atraso. Esq.: comparação de pontos simples, dir.: comparação de pontos com atraso aplicado entre índice SYM-H e componente Bz do campo magnético.	58
Figura 25 – Exemplo de comportamento da correlação cruzada em uma tempestade. O eixo vertical representa o valor do coeficiente de correlação e o eixo horizontal o valor do atraso aplicado.	59
Figura 26 – Propriedade Bz do vento solar causador da tempestade 21 de 08/09/2017. Eixo vertical representando a intensidade da componente Bz do campo magnético e eixo horizontal o período de tempo estudado.	63
Figura 27 – Propriedade Bz do vento solar causador da tempestade 21 de 08/09/2017 retirada da OMNIWeb sem interpolação. Eixo vertical representando a intensidade da componente Bz do campo magnético e eixo horizontal o período de tempo estudado.	63
Figura 28 – SDO AIA193 - Corona - esq. 2011/08/03 13:56, dir. 2011/08/04 04:12	65

Figura 29 – SOHO C2 - esq. 2011/08/03 14:24, dir. 2011/08/04 04:24	65
Figura 30 – SDO AIA211 - Corona - 03/01/2015	67
Figura 31 – Gráfico de todos os parâmetros estudados no período longo mencionado no trabalho, respectivamente de cima para baixo: SYM-H, Bz, By, Vx, densidade de prótons e clock angle. As linhas vermelhas representam o período curto mencionado durante o trabalho - Tempestade 1 com pico mínimo de SYM-H em 06/08/2011	80
Figura 32 – Gráfico de todos os parâmetros estudados no período longo mencionado no trabalho, respectivamente de cima para baixo: SYM-H, Bz, By, Vx, densidade de prótons e clock angle. As linhas vermelhas representam o período curto mencionado durante o trabalho - Tempestade 2 com pico mínimo de SYM-H em 26/09/2011	81
Figura 33 – Gráfico de todos os parâmetros estudados no período longo mencionado no trabalho, respectivamente de cima para baixo: SYM-H, Bz, By, Vx, densidade de prótons e clock angle. As linhas vermelhas representam o período curto mencionado durante o trabalho - Tempestade 3 com pico mínimo de SYM-H em 25/10/2011	82
Figura 34 – Gráfico de todos os parâmetros estudados no período longo mencionado no trabalho, respectivamente de cima para baixo: SYM-H, Bz, By, Vx, densidade de prótons e clock angle. As linhas vermelhas representam o período curto mencionado durante o trabalho - Tempestade 4 com pico mínimo de SYM-H em 09/03/2012	83
Figura 35 – Gráfico de todos os parâmetros estudados no período longo mencionado no trabalho, respectivamente de cima para baixo: SYM-H, Bz, By, Vx, densidade de prótons e clock angle. As linhas vermelhas representam o período curto mencionado durante o trabalho - Tempestade 5 com pico mínimo de SYM-H em 24/04/2012	84
Figura 36 – Gráfico de todos os parâmetros estudados no período longo mencionado no trabalho, respectivamente de cima para baixo: SYM-H, Bz, By, Vx, densidade de prótons e clock angle. As linhas vermelhas representam o período curto mencionado durante o trabalho - Tempestade 6 com pico mínimo de SYM-H em 15/07/2012	85
Figura 37 – Gráfico de todos os parâmetros estudados no período longo mencionado no trabalho, respectivamente de cima para baixo: SYM-H, Bz, By, Vx, densidade de prótons e clock angle. As linhas vermelhas representam o período curto mencionado durante o trabalho - Tempestade 7 com pico mínimo de SYM-H em 01/10/2012	86

Figura 38 – Gráfico de todos os parâmetros estudados no período longo mencionado no trabalho, respectivamente de cima para baixo: SYM-H, Bz, By, Vx, densidade de prótons e clock angle. As linhas vermelhas representam o período curto mencionado durante o trabalho - Tempestade 8 com pico mínimo de SYM-H em 09/10/2012	87
Figura 39 – Gráfico de todos os parâmetros estudados no período longo mencionado no trabalho, respectivamente de cima para baixo: SYM-H, Bz, By, Vx, densidade de prótons e clock angle. As linhas vermelhas representam o período curto mencionado durante o trabalho - Tempestade 9 com pico mínimo de SYM-H em 14/11/2012	88
Figura 40 – Gráfico de todos os parâmetros estudados no período longo mencionado no trabalho, respectivamente de cima para baixo: SYM-H, Bz, By, Vx, densidade de prótons e clock angle. As linhas vermelhas representam o período curto mencionado durante o trabalho - Tempestade 10 com pico mínimo de SYM-H em 17/03/2013	89
Figura 41 – Gráfico de todos os parâmetros estudados no período longo mencionado no trabalho, respectivamente de cima para baixo: SYM-H, Bz, By, Vx, densidade de prótons e clock angle. As linhas vermelhas representam o período curto mencionado durante o trabalho - Tempestade 11 com pico mínimo de SYM-H em 01/06/2013	90
Figura 42 – Gráfico de todos os parâmetros estudados no período longo mencionado no trabalho, respectivamente de cima para baixo: SYM-H, Bz, By, Vx, densidade de prótons e clock angle. As linhas vermelhas representam o período curto mencionado durante o trabalho - Tempestade 12 com pico mínimo de SYM-H em 29/06/2013	91
Figura 43 – Gráfico de todos os parâmetros estudados no período longo mencionado no trabalho, respectivamente de cima para baixo: SYM-H, Bz, By, Vx, densidade de prótons e clock angle. As linhas vermelhas representam o período curto mencionado durante o trabalho - Tempestade 13 com pico mínimo de SYM-H em 07/01/2015	92
Figura 44 – Gráfico de todos os parâmetros estudados no período longo mencionado no trabalho, respectivamente de cima para baixo: SYM-H, Bz, By, Vx, densidade de prótons e clock angle. As linhas vermelhas representam o período curto mencionado durante o trabalho - Tempestade 14 com pico mínimo de SYM-H em 17/03/2015	93

Figura 45 – Gráfico de todos os parâmetros estudados no período longo mencionado no trabalho, respectivamente de cima para baixo: SYM-H, Bz, By, Vx, densidade de prótons e clock angle. As linhas vermelhas representam o período curto mencionado durante o trabalho - Tempestade 15 com pico mínimo de SYM-H em 23/06/2015	94
Figura 46 – Gráfico de todos os parâmetros estudados no período longo mencionado no trabalho, respectivamente de cima para baixo: SYM-H, Bz, By, Vx, densidade de prótons e clock angle. As linhas vermelhas representam o período curto mencionado durante o trabalho - Tempestade 16 com pico mínimo de SYM-H em 20/12/2015	95
Figura 47 – Gráfico de todos os parâmetros estudados no período longo mencionado no trabalho, respectivamente de cima para baixo: SYM-H, Bz, By, Vx, densidade de prótons e clock angle. As linhas vermelhas representam o período curto mencionado durante o trabalho - Tempestade 17 com pico mínimo de SYM-H em 01/01/2016	96
Figura 48 – Gráfico de todos os parâmetros estudados no período longo mencionado no trabalho, respectivamente de cima para baixo: SYM-H, Bz, By, Vx, densidade de prótons e clock angle. As linhas vermelhas representam o período curto mencionado durante o trabalho - Tempestade 18 com pico mínimo de SYM-H em 06/03/2016	97
Figura 49 – Gráfico de todos os parâmetros estudados no período longo mencionado no trabalho, respectivamente de cima para baixo: SYM-H, Bz, By, Vx, densidade de prótons e clock angle. As linhas vermelhas representam o período curto mencionado durante o trabalho - Tempestade 19 com pico mínimo de SYM-H em 13/10/2016	98
Figura 50 – Gráfico de todos os parâmetros estudados no período longo mencionado no trabalho, respectivamente de cima para baixo: SYM-H, Bz, By, Vx, densidade de prótons e clock angle. As linhas vermelhas representam o período curto mencionado durante o trabalho - Tempestade 20 com pico mínimo de SYM-H em 28/05/2017	99
Figura 51 – Gráfico de todos os parâmetros estudados no período longo mencionado no trabalho, respectivamente de cima para baixo: SYM-H, Bz, By, Vx, densidade de prótons e clock angle. As linhas vermelhas representam o período curto mencionado durante o trabalho - Tempestade 21 com pico mínimo de SYM-H em 08/09/2017	100

Figura 52 – Gráfico de todos os parâmetros estudados no período longo mencionado no trabalho, respectivamente de cima para baixo: SYM-H, Bz, By, Vx, densidade de prótons e clock angle. As linhas vermelhas representam o período curto mencionado durante o trabalho - Tempestade 22 com pico mínimo de SYM-H em 26/08/2018 101

Lista de tabelas

Tabela 1	– Tabela com datas utilizados para o estudo das tempestades nos períodos longos, além do pico mínimo de perturbação atingido de acordo com dados do SYM-H.	42
Tabela 2	– Tabela com valores e datas de mínimos SYM-H e Bz. As colunas representam, respectivamente, o número do evento de tempestade de acordo com a Tabela 1, as datas do pico mínimo do SYM-H, intensidade no SYM-H, datas de pico mínimo do Bz, intensidade do pio mínimo de Bz.	53
Tabela 3	– Correlação utilizando dados reais e suavizados para SYM-H e Bz durante os eventos de tempestade magnética no período mais longo estudado. As colunas representam respectivamente as datas de início e final longo, correlação simples e correlação simples suavizada. As linhas demonstram os valores para cada evento estudado.	55
Tabela 4	– Correlação utilizando dados reais e suavizados para SYM-H e Bz durante os eventos de tempestade magnética. As colunas representem respectivamente a data de pico mínimo do SYM-H, intensidade do SYM-H, correlação simples e correlação simples suavizada. As linhas demonstram os valores para cada evento estudado.	56
Tabela 5	– Correlação cruzada utilizando dados reais e suavizados para SYM-H e Bz durante os eventos de tempestade magnética. As colunas representem respectivamente as datas de início longo e final longo, correlação cruzada e correlação cruzada suavizada. As linhas demonstram os valores para cada evento estudado.	60
Tabela 6	– Valores de correlação cruzada e correlação cruzada suavizada para cada tempestade no período curto. As colunas representam respectivamente data do pico mínimo do SYM-H, intensidade do pico mínimo do SYM-H, coeficiente de correlação cruzada e coeficiente de correlação cruzada suavizada. As linhas representam os eventos estudados.	61
Tabela 7	– Valores do melhor atraso a partir da correlação cruzada e diferença de tempo em minutos entre o pico mínimo do SYM-H e pico mínimo do Bz. Cada linha representa um evento estudado.	62
Tabela 8	– Tabela de eventos identificados relacionados às tempestades. As colunas representam respectivamente a data do pico mínimo do SYM-H, a intensidade do pico mínimo do SYM-H, o(s) evento(s) relacionado(s) pelo DONKI a cada tempestade estudada, o(s) evento(s) de maneira resumida.	64

Lista de abreviaturas e siglas

SYM-H	Symmetric Disturbance Index for H
DST	Disturbance Storm-Time
ACE	Advanced Composition Explorer
SOHO	Solar and Heliospheric Observatory
LASCO	Large Angle and Spectrometric Coronagraph Experiment
DONKI	Space Weather Database Of Notifications, Knowledge, Information
EIT	Extreme ultraviolet Imaging Telescope
MDI	Michelson Doppler Imager
NASA	National Aeronautics and Space Administration
CME	Coronal Mass Ejection
HSS	High-Speed Stream
ESA	Europea Space Agency
SDO	Solar Dynamics Observatory
EVE	Extreme Ultraviolet Variablity Experiment
HMI	Helioseismic and Magnetic Imager
IMF	Interplanetary Magnetic Field
GSM	Geocentric Solar Magnetospheric System
SSC	Storm Sudden Commencement
IPS	Interplanetary Shock
AIA	Atmospheric Imaging Assembly
STEREO	Solar Terrestrial Relations Observatory
CIR	Co-rotating Interaction Region

Sumário

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	Objetivos	25
2	REVISÃO TEÓRICA	27
2.1	O Ciclo Solar	27
2.2	Manchas Solares e Buracos Coronais	29
2.3	Vento solar	32
2.4	Índice SYM-H, DST e corrente anelar	35
2.5	Fases da tempestade magnética	39
3	METODOLOGIA	41
3.1	Escolha das tempestades analisadas	41
3.2	Análise dos dados interplanetários	44
3.3	Suavização do índice SYM-H e Bz	47
4	RESULTADOS	51
4.1	Os eventos de tempestade magnética	51
4.2	Correlação Simples	52
4.3	Correlação Cruzada	58
4.4	Causas e origens das tempestades estudadas	62
	Conclusão	69
	REFERÊNCIAS	71
	APÊNDICES	77
	APÊNDICE A – GRÁFICOS DAS PROPRIEDADES, SYM-H E CLOCK ANGLE PARA TODAS AS TEMPESTA- DES ANALISADAS NO TRABALHO	79
	APÊNDICE B – ROTINAS EM PYTHON	103
B.1	Rotina de correlação simples Bz/SYM-H	103
B.2	Rotina de correlação cruzada Bz/SYM-H	104
B.3	Rotina de correlação simples suavizada Bz/SYM-H	105
B.4	Rotina de correlação cruzada suavizada Bz/SYM-H	106

B.5	Rotina de geração de gráficos das propriedades do vento solar e clock angle	107
B.6	Rotina de geração de gráfico de dispersão para propriedades do vento solar	108

1 Introdução

Tempestades geomagnéticas trazem grandes consequências para as tecnologias da sociedade moderna, fortes perturbações do campo magnético terrestre podem afetar a infraestrutura dependente de equipamentos espaciais e energética em Terra (CID et al., 2014). Alguns exemplos são: correntes elétricas induzidas em transformadores podendo causar apagões na rede elétrica, alteração no campo magnético terrestre, podendo causar arraste em satélites de baixa e média órbita e falhas em sistemas de comunicação. Tais eventos geomagnéticos são relacionados às fases do ciclo solar, sendo que cada ciclo possui duração de 11 anos, tendo um aumento e diminuição da atividade solar durante este período (HATHAWAY, 2015) (RICHARDSON; WANG; PAULARENA, 2001). O ciclo solar influencia a ocorrência de manchas solares e buracos coronais no Sol, produzindo estruturas como ejeções de massa coronal e feixes rápidos, que possuem papel importante no comportamento do vento solar e, conseqüentemente, na interação deste na magnetosfera terrestre (SCHWENN, 2007).

Ao longo dos anos a interação entre o campo magnético do meio interplanetário e a magnetosfera terrestre tem sido largamente estudada, em parte pelo impacto que uma tempestade severa pode causar nas tecnologias atuais, como o apagão na rede elétrica que ocorreu em Quebec durante uma tempestade magnética em 1989 (CID et al., 2014). É conhecido que alguns fatores como a componente B_z do campo magnético interplanetário tem um papel importante na intensidade da perturbação do campo magnético terrestre (GONZALEZ; TSURUTANI; GONZALEZ, 1999). Essas perturbações são medidas por índices geomagnéticos provenientes de instrumentos em solo, como por exemplo os índices DST (*Disturbance Storm-Time*) e SYM-H (*Symmetric Disturbance Index for H*) provenientes de observatórios na região equatorial, que possibilitam o estudo da intensidade e resposta da magnetosfera durante uma tempestade magnética (KOZYRA; LIEMOHN, 2003).

Através de um estudo correlacional entre propriedades do vento solar que afetam a intensidade das tempestades magnéticas é possível evitar riscos, ou pelo menos identificar com antecedência, de perturbações severas à equipamentos espaciais de pesquisa, satélites, aparelhos de comunicação, sistema GPS, entre outros (CID et al., 2014).

1.1 Objetivos

O objetivo desse trabalho foi analisar a correlação entre a componente B_z do campo magnético interplanetário e o índice geomagnético SYM-H durante tempestades magnéticas intensas do ciclo solar 24, além da relação de outras propriedades do vento

solar com o mesmo índice. A partir disso foram estudadas as estruturas e os eventos solares relacionados às tempestades intensas. O foco será nas seguintes propriedades: Campo magnético interplanetário e suas respectivas componentes (B , B_x , B_y e B_z), velocidade (V_x) e densidade de prótons (d). Como já mencionado nesta mesma Seção anteriormente, a intensidade de uma tempestade magnética é relacionada à componente z do campo magnético interplanetário e sua velocidade. A componente B_y também é estudada a fim do cálculo do clock angle, ou seja, o ângulo de incidência do vento solar na magnetosfera terrestre. A densidade, velocidade, campo magnético interplanetário total e B_z são estudadas de maneira correlacional ao índice SYM-H de perturbação magnética.

2 Revisão teórica

2.1 O Ciclo Solar

Inicialmente, para entendimento dos conceitos que serão demonstrados a seguir neste trabalho, é necessário clarificar do que se trata o ciclo solar, ou seja, o ciclo da atividade magnética do Sol e como esta alteração influencia no demonstrado adiante, dentre outros efeitos.

Segundo [Hathaway \(2015\)](#) o ciclo solar têm duração de 11 anos, representando uma alteração em quantidade, tamanho e posição das manchas solares ([CHARBONNEAU, 2010](#)). Atualmente é sugerido que a origem da atividade magnética do Sol se dá pelo efeito de dínamo solar ([TOBIAS, 2002](#)), segundo [Charbonneau \(2010\)](#), resultado da "*ação indutiva de fluidos dinâmicos penetrando o interior solar*". A inversão dos polos magnéticos, que leva aos ciclos, acontece pela velocidade de rotação do Sol ser maior que no equador, fazendo com que o campo magnético do Sol acaba por ser deformado e entrelaçado, até que os polos se invertem por completo e o campo magnético na superfície solar retorna ao estado inicial em complexidade. A Figura 1 mostra o Sol e seu movimento de rotação ao longo do tempo, onde as linhas em magenta representam o campo magnético. Na painel à esquerda, o campo magnético do Sol é mostrado sem considerar o movimento de rotação. No painel central e à direita a rotação diferenciada do Sol, ou seja, a região equatorial solar gira em torno do eixo de rotação do Sol com velocidade maior do que as regiões de altas latitudes. Observa-se que as linhas de campo magnético vão se entrelaçando a medida que o ciclo solar avança no tempo. ([YOUNG, 2013](#)).

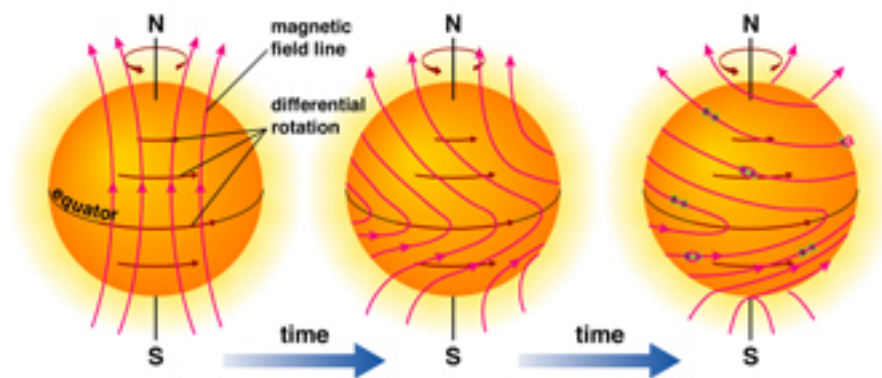
Os eventos de alteração dos polos magnéticos do Sol marcam os períodos de mínimo e máximo solar, com cada período tendo suas características próprias, assim como a transição entre eles. Os mínimos solares ocorrem no início do ciclo solar, momento em que o Sol possui uma menor quantidade de manchas solares ([ERICKSON, 2021](#)), tendo seu campo magnético médio mais baixo e superfície solar praticamente dipolar. As ejeções de massa coronal também são poucas e existem buracos coronais em altas latitudes, polos, do Sol. ([RICHARDSON; WANG; PAULARENA, 2001](#)).

Com o decorrer do tempo, o Sol passa por uma transição entre o mínimo solar e o máximo solar ([ERICKSON, 2021](#)), chamada de fase ascendente. Na etapa do máximo solar, é possível observar uma menor ocorrência dos buracos coronais nos polos, um aumento na intensidade do campo magnético do vento solar e das manchas solares, a estrutura do campo na superfície solar também tende a ficar mais desorganizada e existe um aumento na frequência das ejeções de massa coronal (CME) ([RICHARDSON; WANG; PAULARENA,](#)

2001).

Após o aumento da atividade solar durante o máximo o Sol inicia novamente um período de transição, desta vez chamada de fase descendente, de volta para o mínimo solar até o encerramento ciclo vigente e início do subsequente (ERICKSON, 2021). O ciclo solar então se encerra com o desaparecimento total ou parcial das manchas solares e um novo ciclo se inicia após a observação da primeira mancha no disco solar. É importante ressaltar o impacto deste ciclo no vento solar e, conseqüentemente, da interação deste na magnetosfera terrestre. Também é comum manchas do novo ciclo surgirem enquanto ainda há manchas do ciclo antigo. Mas sempre há dias sem manchas.

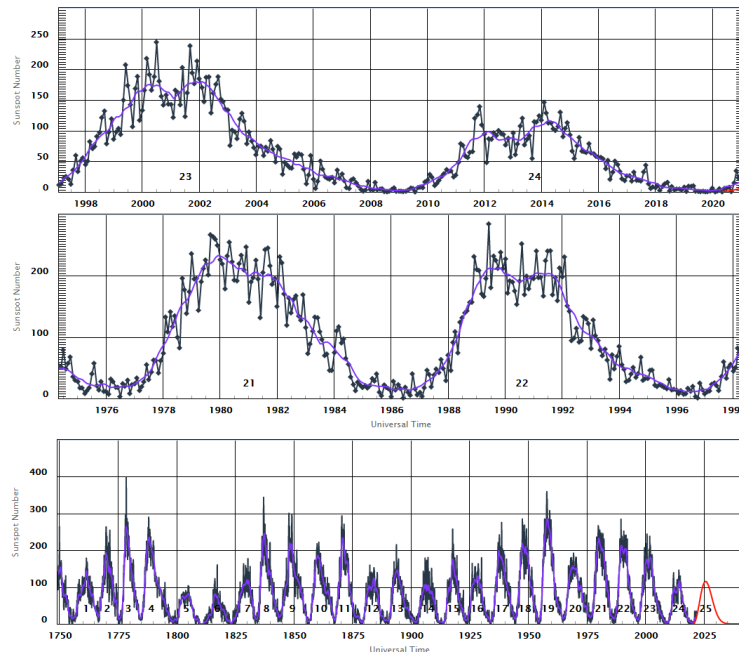
Figura 1 – Rotação diferenciada do Sol, ou seja, a região equatorial solar gira em torno do eixo de rotação do Sol com velocidade maior do que as regiões de altas latitudes. As linhas em magenta representam o campo magnético abaixo da superfície visível. Observa-se que as linhas do campo magnético vão se entrelaçando a medida que o ciclo solar avança no tempo.



Fonte: YOUNG (2013)

Para situar esse projeto em relação aos ciclos solares, este trata-se apenas de medições relacionadas ao ciclo solar 24, ou seja, o vigésimo quarto período de 11 anos contendo mínimo e máximo solar. Esse período se deu entre os anos de 2008 e 2020 (PESNELL, 2020), sendo o mais fraco, em relação à atividade solar, desde o ciclo 14, de 1902 até 1913. Galileo iniciou a contagem das manchas de forma sistemática. Experimento mais longevo da ciência, com mais de 400 anos e ainda em andamento. A 2 mostra o número de manchas solares, (*sunspots*), ao longo do tempo. Os dois painéis superiores mostram o número de manchas solares dos ciclos 21 ao 24 (de 1974 a 2019). O mais abaixo mostra todo o período em que se tem medidas, de 1750 a 2021. É possível observar os máximos e mínimos de manchas, indicando a ocorrência dos ciclo de atividade solar. Tais manchas são utilizadas como indicadores da atividade solar através do *International Sunspot Number* (HATHAWAY, 2015). É válido observar que há outros ciclos de períodos maiores que */approx*11 anos, como o ciclo de Gleisberg 80-100 anos, que explica o porquê do ciclo 24 ter sido semelhante ao ciclo 14, por exemplo.

Figura 2 – Os dois painéis superiores mostram o número de manchas solares dos ciclos 21 ao 24 (de 1974 a 2019). O mais abaixo mostra todo o período em que se tem medidas, de 1750 a 2021.



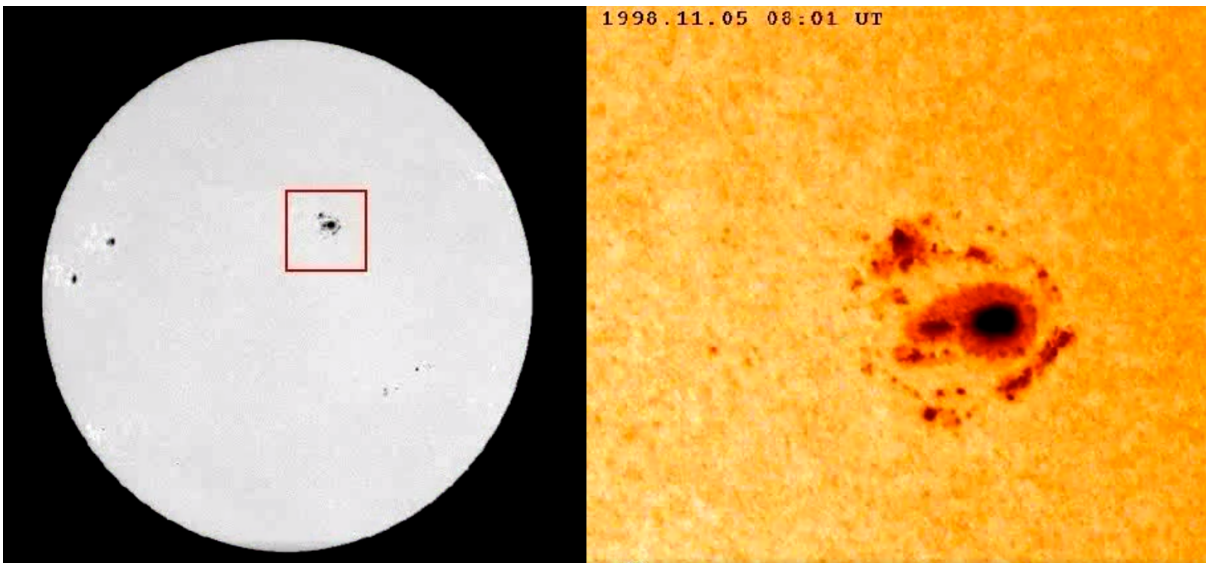
Fonte: NOAA (2021b)

2.2 Manchas Solares e Buracos Coronais

Como supracitado, tanto durante o máximo, quanto durante o mínimo solar há a ocorrência de manchas solares. Segundo Solanki (2003), a definição de mancha solar passa pela manifestação mais visível de concentrações de campo magnético e interação desta com o plasma solar, porém, muito mais que isso, tendem a ter um papel importante em relação a ejeções de massa coronal (CME), erupções solares e os efeitos destes fenômenos sentidos na Terra (NWS, 2020). Na Figura 3 é possível observar na imagem à esquerda uma mancha solar através de um magnetograma do satélite SOHO do dia 06/11/1998, à direita é possível ver a mesma mancha através do equipamento MDI do mesmo satélite.

As manchas solares possuem um campo magnético intenso. A pressão magnética na área da mancha solar aumenta e a pressão atmosférica dos arredores diminui, gerando assim um ponto de baixa temperatura, já que a convecção da matéria quente para essa área é interrompida mediante ao intenso campo (NWS, 2020). A Figura 4 mostra a evolução da posição em latitude solar das manchas ao longo do tempo, de 1870 a 2020, sendo que esse gráfico é conhecido como diagrama borboleta. Neste diagrama é possível perceber que as manchas solares ocorrem aos pares, com polaridades opostas e em latitudes mais altas, à medida que o ciclo avança as novas manchas surgem em latitudes mais baixas. Tais manchas representam uma área mais escura do Sol, umbra, envolta por uma área mais clara, penumbra, isso em relação à fotosfera, que é mais clara devido à temperatura mais

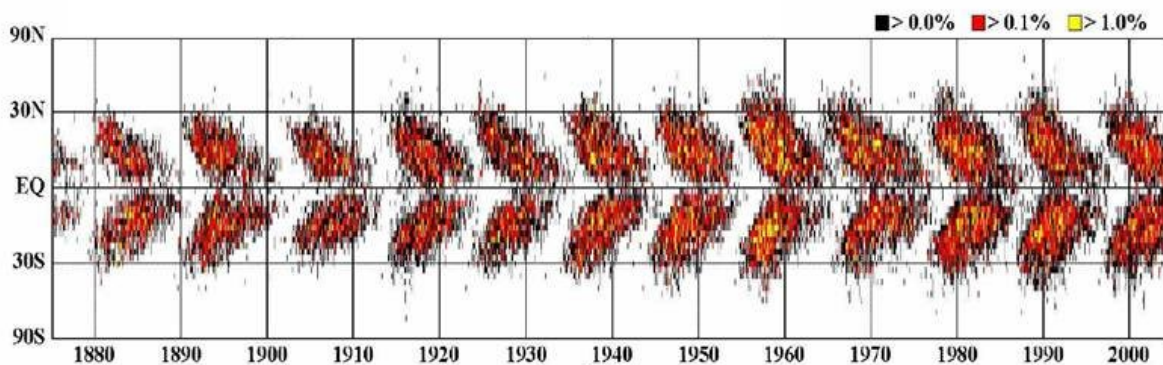
Figura 3 – Mancha solar do dia 06/11/1998 capturada pelo SOHO



Fonte: Courtesy of SOHO/EIT e MDI consortium. SOHO is a project of international cooperation between ESA and NASA

alta. Além destas manchas serem relativamente grandes, com tamanho médio igual ao da Terra, as temperaturas, apesar de mais baixas quando comparadas à alguns pontos do Sol, são ainda extremamente altas para os padrões terrestres, estando na casa dos milhares de Kelvins (NWS, 2020).

Figura 4 – Evolução temporal da posição em latitude solar das manchas, de 1870 a 2020.

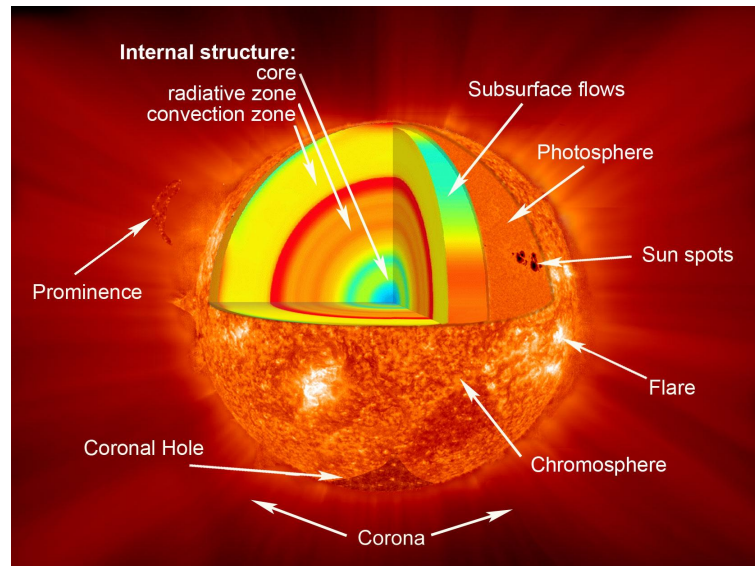


Fonte: Edmondson (2009)

Já os buracos coronais são estruturas que ocorrem, como o nome sugere, na Coroa solar, diferentemente das manchas solares, que, como já comentado anteriormente, se tratam de regiões mais frias do Sol sob a Coroa. Os buracos coronais são regiões menos densas, formando, uma espécie de buraco nesta área da atmosfera solar (PALCA, 2013). Como mostra a Figura 5, é possível dividir e simplificar a estrutura do Sol em duas partes, o interior solar e a atmosfera solar. O interior do Sol é subdividido em três partes, o núcleo e as zonas de convecção e radiação. Já a atmosfera solar em fotosfera, a superfície visível do Sol, cromosfera, uma região em que a temperatura é acrescida acentuadamente, região

de transição, que se dá entre a cromosfera e a Coroa e, finalmente, a Coroa solar, que pode ser classificada como a atmosfera externa do Sol (ZELL, 2013).

Figura 5 – Imagem ilustrativa das camadas solares



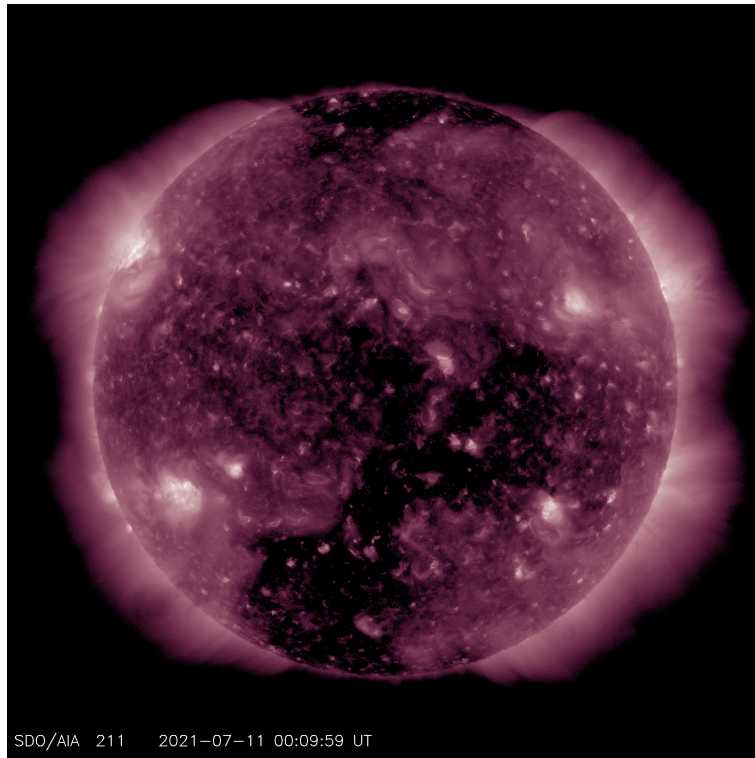
Fonte: Zell (2013)

Estes buracos na Coroa, além de serem menos densos e mais frios que o plasma que os envolve, também são regiões de campos magnéticos unipolares, ou seja, abertos¹, o que permite ao vento solar escapar com mais velocidade, sendo chamados feixes rápidos ou *High Speed Streams* (HSS). Outra característica importante em relação ao que foi citado anteriormente é a estabilidade desses buracos, sendo estes mais estáveis no mínimo solar perto dos polos (NOAA, 2021a). Conforme, e apenas se, tais buracos crescem em tamanho e se movem latitudinalmente em direção ao equador solar é que podemos, em Terra, sentir os efeitos dos *High Speed Stream*. Um dos fatos mais relevantes aqui, que será revisitado na seção 2.3, é a formação desses *High Speed Stream*, fluxo de matéria que escapa em alta velocidade do Sol através dos buracos coronais devido à esta abertura do campo magnético. Os HSSs podem impactar a Terra de diversos modos, sendo possível obter medições das perturbações magnéticas que estes desencadeiam ao interagir com a magnetosfera terrestre.

Para observação da Coroa solar, e os buracos coronais, são utilizados telescópios com filtros de 211Å ou 193Å de comprimento de onda ultravioleta, estes filtros, como mostrado na Figura 6, disponibilizados pelo satélite SDO (*Solar Dynamics Observatory*), destaca, além da Coroa solar, as regiões ativas da atmosfera externa, possibilitando então a observação da atividade solar e, certamente, dos buracos coronais (NASA, 2021). Outros

¹ Os campos magnéticos não são, em essência, abertos, já que isso violaria uma das leis de Maxwell, o que ocorre é que existe um campo magnético predominante em uma direção, já que as linhas de campo se estendem por grandes distâncias, através do meio interplanetário, em relação ao raio solar antes de retornarem ao Sol ou se conectarem com outros campos magnéticos

Figura 6 – Imagem da SDO (211Å) do dia 11/07/2021 com buraco coronal.



Fonte: Courtesy of NASA/SDO and the AIA, EVE, and HMI science teams [NASA \(2021\)](#).

satélites como o SOHO (*Solar and Heliospheric Observatory*), com instrumentos chamados de coronógrafos, LASCO (*Large Angle and Spectrometric Coronagraph Experiment*) C2 e LASCO C3, são utilizados para observação da coroa solar, como ejeção de massa coronal por exemplo.

2.3 Vento solar

Para o estudo das tempestades magnéticas é de suma importância o entendimento do vento solar, das estruturas relacionadas às suas propriedades e sua interação com a magnetosfera terrestre. O vento solar consiste, principalmente, em um fluxo de prótons e elétrons em estado de plasma que se origina no Sol e se direciona de maneira contínua por todo o espaço ([NOAA, 2021c](#)). Adicionalmente, o vento solar ainda carrega o campo magnético do Sol, através de um fenômeno conhecido como fluxo congelado ao campo magnético ([Baumjohann; Treumann, 1996](#)).

Esse fluxo contínuo de partículas advindas do Sol possui propriedades que podem ser estudadas, como o já citado campo magnético B (e suas respectivas componentes x , y e z), velocidade, densidade de prótons, entre outras. Aqui é importante citar dois conceitos, primeiramente a relação do vento solar com as regiões do Sol. Durante o mínimo solar, em que os buracos coronais estão principalmente concentrados em altas latitudes, o vento

solar pode ser dividido em duas categorias baseadas na velocidade do plasma, rápido e lento, associadas respectivamente às regiões alta e baixa latitude (FELDMAN; LANDI; SCHWADRON, 2005). Schwenn (2007) resume em seu estudo quatro principais tipos de vento de solar e suas origens. O vento solar em feixes rápidos, chamados de *High Speed Stream* e mencionados neste trabalho pela sigla HSS, que se originam em regiões de buracos coronais. O vento solar lento originado em regiões não ativas do Sol. O vento solar lento originado sob regiões ativas do Sol. E o vento solar originado pelo plasma expelido do Sol durante ejeções de massa coronal, chamado neste trabalho pela sigla CME - *Coronal Mass Ejection*. No presente estudo o foco foi dado para o vento solar relacionado aos HSSs e CMEs.

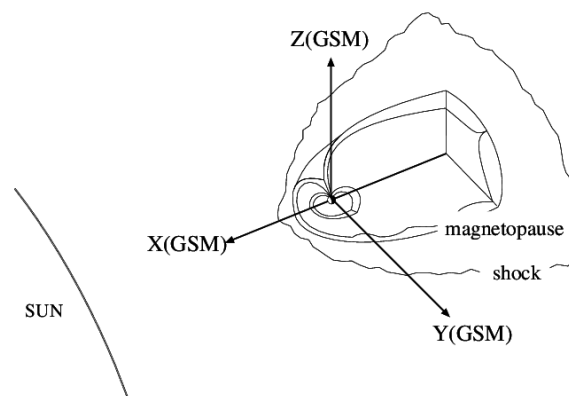
Os HSSs são caracterizados por um aumento em sua velocidade, superando os 500km/s, podendo durar por dias (GRANDIN; AIKIO; KOZLOVSKY, 2019). Segundo Grandin, Aikio e Kozlovsky (2019), quando um HSS interage com um fluxo lento do vento solar, ocorre uma compressão do campo magnético interplanetário e da densidade do plasma, criando regiões chamadas de regiões de interação co-rotante (CIR, do inglês Corotating interaction regions). Os HSSs também podem ser causadoras de tempestades magnéticas. Como o eixo de rotação do Sol e o vetor perpendicular ao plano da eclíptica são angulados entre si, quando a Terra passa por setores onde o vento solar é rápido, tempestades magnéticas podem ser originadas.

A causa principal de tempestades magnéticas está associada a componente Bz do campo magnético interplanetário (IMF Bz), que permite o transporte de energia do vento solar para a magnetosfera através da reconexão com o campo magnético terrestre (GONZALEZ; TSURUTANI; GONZALEZ, 1999). Segundo Gonzalez, Tsurutani e Gonzalez (1999), um vento solar convencional possui uma velocidade aproximada de 400km/s e campo magnético de 5nT, sendo que, para interação com a magnetosfera terrestre originar uma tempestade intensa é necessário que estes valores sejam mais altos, além disso, também é preciso que o campo magnético esteja voltado para o sul (Bz) por certo período de tempo. Gonzalez, Tsurutani e Gonzalez (1999) ainda descreve que durante o máximo solar a atividade é dominada por erupções solares associadas a CMEs. As CMEs rápidas provenientes do Sol (são classificadas como CMEs rápidas aquelas com $V > 500km/s$) são as estruturas que possuem campo magnético alto.

Para entender melhor os resultados referentes a estrutura do vento solar como a velocidade e a intensidade do campo magnético é preciso determinar coordenadas da Terra em relação ao Sol, as coordenadas que serão referenciadas nesse trabalho se remetem ao sistema GSM (*Geocentric Solar Magnetospheric System*) como mostrado na Figura 7. Tais coordenadas tem origem no centro da Terra, eixo x é definido como a linha que conecta a Terra ao Sol, o eixo y é perpendicular ao momento de dipolo magnético e o eixo z positivo, possui o mesmo sentido do polo magnético norte. É importante salientar que todas as

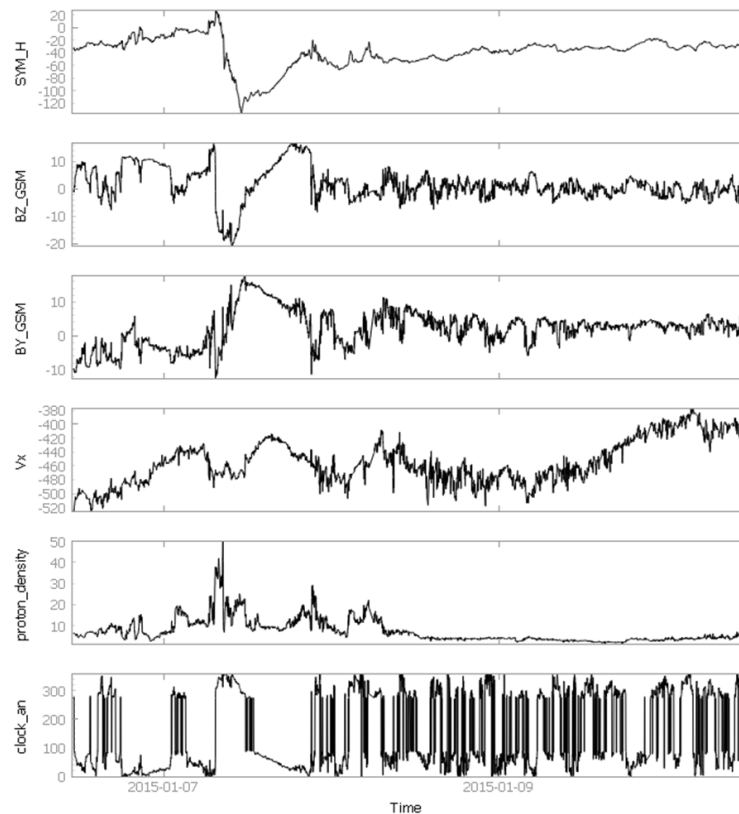
coordenadas citadas (B_z , B_y , B_x , V_x) são baseados no sistema GSM. Adicionalmente, na Figura 8, é mostrado as propriedades do vento solar estudadas e seus respectivos gráficos, além do índice geomagnético. De cima pra baixo é possível observar o gráfico de SYM-H (*Symmetric Disturbance Index for H*), B_z , B_y , V_x , densidade de prótons e *clock angle* para a tempestade de janeiro de 2015, com pico mínimo SYM-H em 07/01/2015. No dia em questão ocorre uma mínima de B_z , indicando B_z sul, assim como um aumento positivo em B_y , também é visto um aumento na velocidade V_x até aproximadamente -420km/s , um aumento na densidade de prótons momentos antes, alcançando 50cm^{-3} e um mínimo SYM-H de aproximadamente -120nT , indicando a ocorrência de uma tempestade magnética.

Figura 7 – Diagrama mostrando o sistemas de coordenadas GSM



Fonte: [Tanskanen et al. \(2002\)](#)

Figura 8 – Parâmetros do vento solar (B_z , B_y , V_x , densidade e clock angle) que causaram a tempestade magnética registrada pelo índice SYM-H em janeiro de 2015.



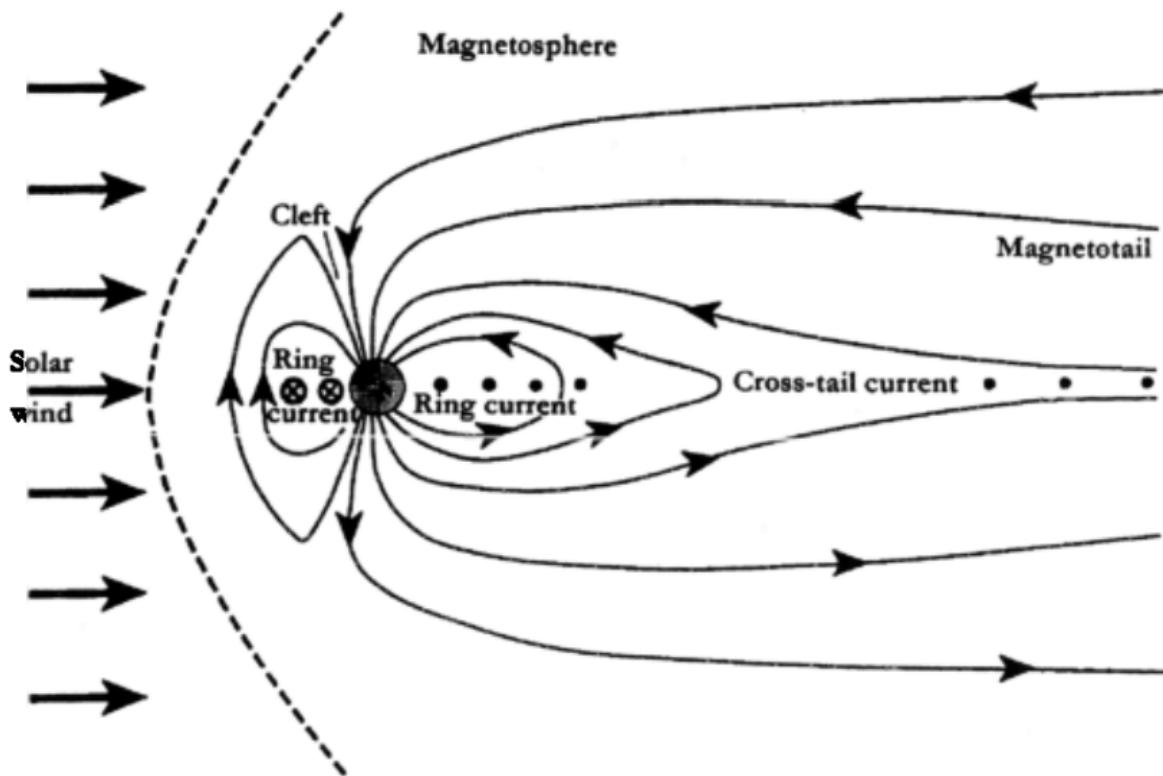
Fonte: Autor

2.4 Índice SYM-H, DST e corrente anelar

A ocorrência de uma tempestade geomagnética acontece com a interação entre o campo magnético interplanetário e o campo magnético terrestre, o que gera uma circulação intensa do plasma da magnetosfera, aumentando a energia da corrente anelar a níveis mais elevados que o usual (KOZYRA; LIEMOHN, 2003). Para entender mais a fundo, é necessário estudar as propriedades da magnetosfera terrestre e a utilização de índices geomagnéticos, como o SYM-H (usado neste trabalho) e o índice DST (*Disturbance Storm-Time*). A propriedade principal que define uma tempestade geomagnética é o aumento da corrente anelar (GONZALEZ et al., 1994). A corrente anelar (ou *ring current*) consiste em uma corrente elétrica de milhões de amperes em torno da Terra, sendo uma característica da interação entre o vento solar e o campo magnético e ionosfera terrestre (MOORE, 2007). Essa corrente está situada no plano equatorial em uma altitude de $10.000\text{km} \sim 60.000\text{km}$ da superfície terrestre (DAGLIS et al., 1999). Um diagrama da magnetosfera pode ser observado na Figura 9, onde as setas indicam o fluxo do vento solar, as linhas pretas representam o campo magnético da Terra, a linha tracejada é a posição da frente de choque, a cúspide representada pela abertura entre a magnetosfera e o campo interplanetário associado aos polos magnéticos (BELL, 1981), a bainha magnética envolvendo as linhas

de campo da Figura e os pontos do lado direito da Terra indicando a corrente anelar que sai do plano nessa região e entra no lado esquerdo, conforme representado por x. À direita é observada a cauda magnética e a *cross-tail current*.

Figura 9 – Diagrama esquemática da magnetosfera terrestre. Na Figura é possível observar a incidência do vento solar, assim como a corrente anelar.

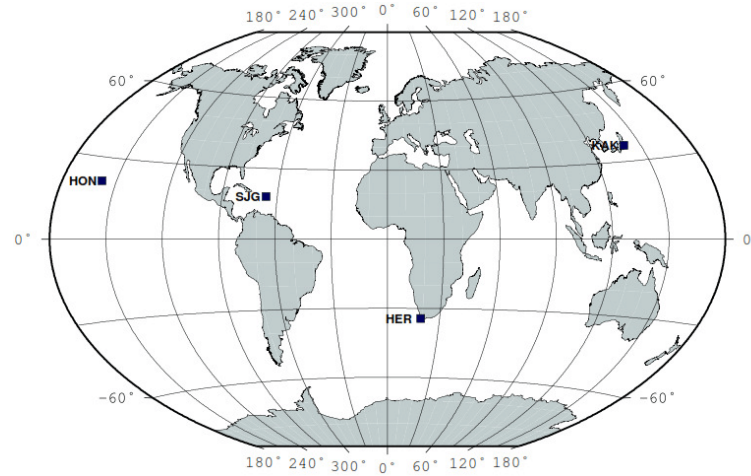


Fonte: [Daglis et al. \(1999\)](#).

Sendo assim, a fim de identificar uma tempestade magnética e sua respectiva intensidade, o uso do índice DST é uma prática comum. O índice DST mostra os valores médios globais de perturbações magnéticas axiais no equador e é medido em Terra através de quatro observatórios. Na Figura 10 é possível observar a localização dos quatro observatórios que compõe a rede DST, indicado por quadrados sobre o mapa da Terra. Esses observatórios estão presentes em latitudes baixas e médias do planeta e suas medidas possuem contribuições da corrente da magnetopausa, correntes de anel (parcial e simétrica), entre outras, porém o índice é majoritariamente dominado pela corrente anelar ([KOZYRA; LIEMOHN, 2003](#)).

É importante citar que o índice de perturbação DST é medido em nT. Como mostrado por [Sckopke \(1966\)](#), para estimar o campo magnético de perturbação na superfície da Terra é suficiente o cálculo desta perturbação no centro terrestre. Além disso, no mesmo estudo, [Sckopke \(1966\)](#) cita que existem duas formas de calcular a perturbação, ou diretamente pelo estresse das partículas ou avaliando a corrente elétrica originada pelo

Figura 10 – Mapa das localizações dos quatro observatórios do índice DST



Fonte: Onovughe (2018).

movimento das partículas, aplicando a lei de Biot-Savart em seguida. A partir disso, Daglis et al. (1999) mostra que a perturbação ΔB na superfície geomagnética equatorial é proporcional a energia das partículas na corrente anelar, e se dá pela relação da Equação 2.1,

$$\frac{\Delta B}{B_0} \propto \frac{2E}{3E_m}, \quad (2.1)$$

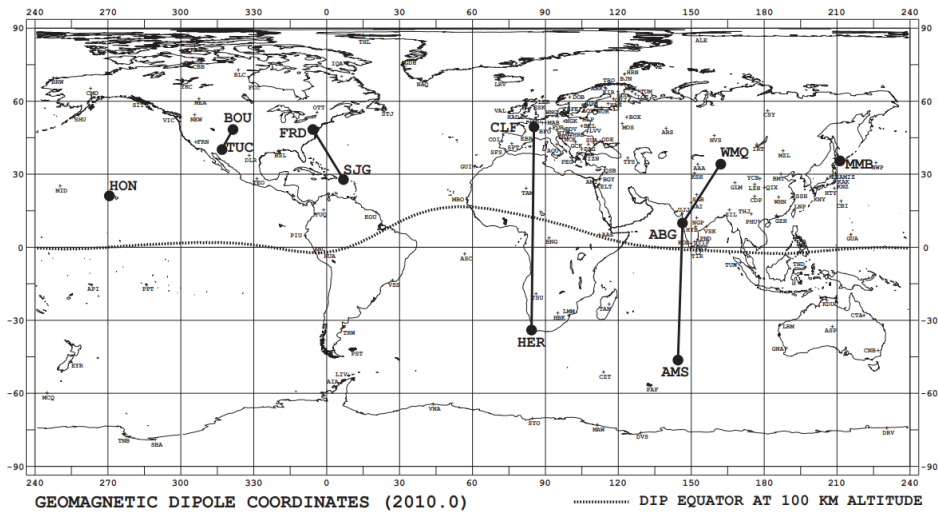
em que B_0 é a intensidade do campo magnético médio da superfície da Terra no equador, E é a energia total das partículas na corrente anelar e E_m é a energia do campo de dipolo sobre a superfície da Terra (DAGLIS et al., 1999).

Os índices geomagnéticos como o DST e o SYM-H são fonte de informações sobre as tempestades a partir da relação entre a corrente anelar e as perturbações magnéticas na superfície terrestre. Para a realização deste estudo foi considerado o índice SYM-H ao invés do índice DST. Primeiramente, é importante citar que os índices são essencialmente os mesmos (IYEMORI et al., 2010), o índice DST é composto de outros índices, dentre eles o SYM-H, embora seja dominado pelo comportamento do SYM-H, sendo que a principal diferença é a resolução. Enquanto a resolução dos dados obtidos pelo DST é por hora, o SYM-H possui resolução de minutos.

O índice SYM-H é usado, assim como o DST, para descrever perturbações no campo geomagnético em relação a componente horizontal H. Na Figura 11 é possível observar todos os observatórios responsáveis pelos dados de SYM-H, alguns em latitudes mais altas que do índice DST, representados por círculos pretos. É importante ressaltar que apenas seis observatórios são usados em cada mês (IYEMORI et al., 2010).

Portanto, como comentado anteriormente nesta seção e corroborado por estudos anteriores (ex.: Iyemori et al. (2010), Wanliss e Showalter (2006)), o índice SYM-H e DST

Figura 11 – Mapa das localizações dos observatórios do índice SYM-H



Fonte: Iyemori et al. (2010).

são similares, diferenciados pela resolução é método de cálculo (WANLISS; SHOWALTER, 2006). Sendo assim, o uso do índice SYM-H é difundido no meio para identificação de tempestades magnéticas, ou seja, perturbações no campo magnético terrestre e suas respectivas intensidades.

Neste momento é relevante comentar sobre o fenômeno de reconexão magnética, que explica a dependência da atividade geomagnética com a orientação do campo magnético interplanetário (MCPHERRON, 2021). Como mencionado por Souza et al. (2016), a reconexão magnética se caracteriza pela interconexão das configurações magnéticas a partir da interação entre regimes de plasma, gerando troca de massa, energia e momento, causando assim, uma conversão da energia armazenada no campo magnético em energia térmica e cinética. Esse fenômeno, é o principal mediador da interação entre o vento solar e a magnetosfera terrestre, já que gera aberturas na magnetosfera, permitindo a entrada de partículas, causadoras de perturbações no campo magnético (SOUZA et al., 2016) (FERREIRA et al., 2017).

Novamente na Figura 9, que representa o campo magnético terrestre, é possível perceber que no lado esquerdo, onde ocorre o choque do vento solar com a magnetosfera indicada pela linha tracejada, as partículas são desaceleradas, atuando como uma barreira natural do planeta. Em condições ideais do vento solar, como IMF Bz sul, uma primeira reconexão acontece na parte diurna da fronteira externa da magnetosfera, conhecida como magnetopausa. Então, o campo magnético reconectado é arrastado junto com o plasma para a parte noturna da magnetosfera, também chamada de cauda magnética. Na região da cauda uma segunda reconexão acontece e parte do plasma é acelerado em direção a Terra, atingindo as camadas mais internas da magnetosfera. É desta forma que as partículas do vento solar adentram na magnetosfera e perturbam a corrente anelar. A reconexão na

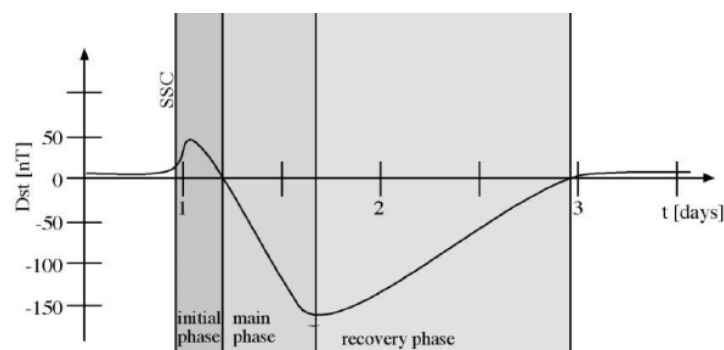
cauda magnética terrestre pode ser dividida em três tipos: a reconexão na cauda distante ($> 100R_e$), na cauda próxima ($20 - 30R_e$) e a formação de *loops* magnéticos na camada neutra (NISHIDA, 1990).

2.5 Fases da tempestade magnética

As tempestades magnéticas podem ser divididas em quatro fases, a fase de início abrupto (*storm sudden commencement* - SSC), a fase inicial, a fase principal e a fase de recuperação (AKASOFU, 2018).

A fase SSC, como mencionado por Akasofu (2018), é um período de aproximação do fluxo de plasma solar em relação ao campo magnético terrestre. Quando isso ocorre a corrente de Chapman-Ferraro é induzida na superfície frontal do campo dipolar terrestre na região diurna, fazendo com que a força de Lorentz associada a esta pare o avanço do fluxo. Uma vez que o avanço do fluxo é parado a corrente de Chapman-Ferraro flui nos limites da magnetosfera, tendo um efeito de compressão do dipolo terrestre. Esse efeito é observado nos gráficos dos índices SYM-H e DST como um pico positivo no início da tempestade. A fase inicial da tempestade é uma fase que dura, em média, algumas horas antes da fase principal (AKASOFU, 2018). Na fase principal ocorre a queda nos índices geomagnéticos (como DST e SYM-H) até o pico mínimo da tempestade. A fase final das tempestades é representadas por duas funções distintas, ou seja, pode ser dividida em dois comportamentos diferentes (AKASOFU, 2018). Isso é abordado mais adiante durante a metodologia para escolha dos períodos estudados em cada tempestade, baseado no estudo de Kozyra e Liemohn (2003). Na Figura 12, é possível observar, a partir do que seria um gráfico referente a uma tempestade genérica, as fases que esta possui. Da esquerda para direita, progredindo no tempo, a fase de SSC, fase inicial, fase principal e fase de recuperação, em relação ao índice DST.

Figura 12 – Fases de uma tempestade magnética. Da esquerda para direita, progredindo no tempo, a fase de SSC, fase inicial, fase principal e fase de recuperação, em relação ao índice DST.



Fonte: Kasran et al. (2018).

3 Metodologia

3.1 Escolha das tempestades analisadas

As tempestades magnéticas escolhidas para realização deste estudo foram baseadas nos seguintes critérios. O primeiro critério se dá pela ocorrência dentro do período do ciclo solar 24, que, como já comentado, ocorreu entre os anos de 2008 e 2019. Todas as tempestades analisadas estão dentro deste período. O segundo se dá pela intensidade magnética da tempestade, neste caso, apenas as tempestades com picos de perturbação magnéticas identificadas pelo índice SYM-H com valores menores que -100nT foram incluídas no estudo, classificadas por [Gonzalez et al. \(1994\)](#) como tempestades magnéticas intensas. Isso restringiu a pesquisa para 25 tempestades dentro do período do ciclo solar 24. Porém houve uma restrição em relação ao comportamento das tempestades, sendo excluídas outras 3 tempestades que possuem comportamentos anômalos, como duas tempestades ocorrendo em sequência antes dos períodos de recuperação serem identificados.

A Tabela 1 mostra as tempestades escolhidas e seus respectivos períodos de tempo analisados dentro deste estudo, além do pico mínimo de perturbação atingido de acordo com dados do SYM-H. Uma vez as tempestades selecionadas, foi preciso a definição de um período de tempo para análise, seja das propriedades, da correlação entre as curvas, do comportamento, entre outros. Para tanto foram definidos dois períodos de tempo para cada tempestade, um deles mais genérico, abrangendo toda a tempestade, desde antes da fase inicial até meados da fase de recuperação lenta, esse período variou entre 3 e 4 dias independente do comportamento das tempestades. O segundo período de tempo analisado, foi mais criterioso e dependeu diretamente do comportamento da tempestade, sendo assim, teve dois critérios estabelecidos para determinar a duração: 1.Data e hora de início da fase inicial; 2.Data e hora final da fase de recuperação abrupta, deixando de fora a fase de recuperação lenta. A intenção de analisar um período de tempo mais restrito foi a possibilidade de focar na fase principal da tempestade, que é onde ocorre o pico mínimo de perturbação. Sendo assim, tanto para os estudos correlacionais abordados mais adiante, como para a discussão em relação às propriedades dos eventos, teve-se uma maior assertividade, eliminando períodos de normalidade anteriores às tempestades e períodos longos de instabilidade, como na fase de recuperação lenta.

Além das propriedades analisadas, da perturbação do SYM-H, causa da tempestade e correlações estudadas, também foi calculado o *Clock Angle* de cada tempestade. O *Clock Angle* representa o ângulo de incidência do vento solar na magnetosfera, podendo ser calculado pelo arco tangente da componente B_y com a componente B_z ([GROCOTT; MILAN, 2014](#)). O cálculo do *Clock Angle* foi realizado por uma rotina em Python e teve

Tabela 1 – Tabela com datas utilizados para o estudo das tempestades nos períodos longos, além do pico mínimo de perturbação atingido de acordo com dados do SYM-H.

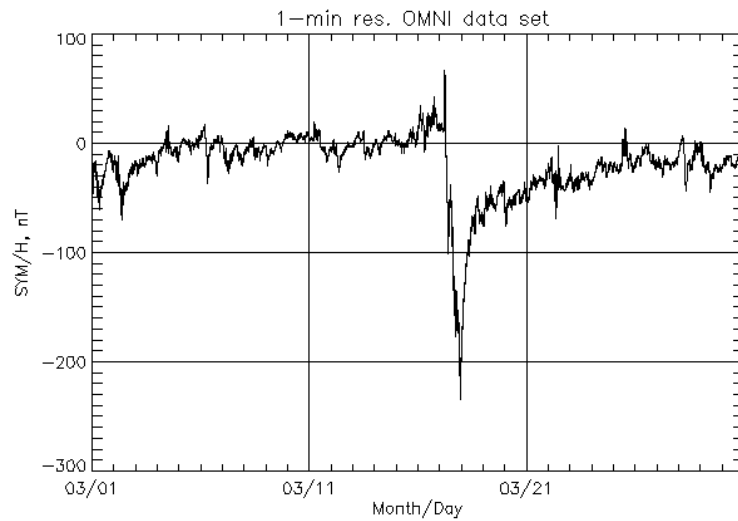
Index	Data (início longo)	Data (final longo)	SYM-H Mínimo
1	2011-08-05	2011-08-08	-126.00
2	2011-09-25	2011-09-29	-116.00
3	2011-10-24	2011-10-27	-160.00
4	2012-03-08	2012-03-11	-150.00
5	2012-04-23	2012-04-26	-125.00
6	2012-07-14	2012-07-17	-123.00
7	2012-09-30	2012-10-03	-138.00
8	2012-10-08	2012-10-11	-116.00
9	2012-11-13	2012-11-17	-118.00
10	2013-03-16	2013-03-19	-132.00
11	2013-05-31	2013-06-03	-137.00
12	2013-06-28	2013-07-01	-111.00
13	2015-01-06	2015-01-10	-135.00
14	2015-03-16	2015-03-19	-234.00
15	2015-06-21	2015-06-24	-208.00
16	2015-12-18	2015-12-22	-170.00
17	2015-12-31	2016-01-04	-117.00
18	2016-03-05	2016-03-08	-110.00
19	2016-10-12	2016-10-15	-114.00
20	2017-05-27	2017-05-30	-142.00
21	2017-09-07	2017-09-13	-146.00
22	2018-08-25	2018-08-28	-206.00

Fonte: Autor

seus dados posteriormente gerados em formato gráfico ao longo do período analisado, como mostra a Figura exemplo 14, onde é possível perceber que o ângulo varia de 0° à 360° ao longo do tempo. A intenção é analisar o ângulo de incidência em conjunto com outras propriedades no tempo, sendo elas, principalmente, a velocidade, a densidade e a intensidade do campo magnético nos planos Y e Z, estes parâmetros dão o contexto da estrutura interplanetária causadora da tempestade magnética. A Figura 14, mostra as propriedades analisadas nos dois períodos para a tempestade de 09/10/2012 - Evento 8. De cima para baixo: SYM-H em nT, Bz em nT, By em nT, Vx em km/s, densidade de prótons em cm^3 , clock angle em graus. Esq.: Período mais longo estudado. Dir.: Período mais curto estudado. As propriedades analisadas são, respectivamente:

- SYM-H (*Symmetric Horizontal Component Disturbance*): Índice utilizado para descrever perturbações geomagnéticas em latitudes médias em termos de perturbações longitudinais simétricas para a componentes H (paralela ao eixo do dipolo) (IYE-

Figura 13 – Índice SYM-H do mês de março de 2015. Eixo vertical representa a intensidade das medições do índice SYM-H. Eixo horizontal representa o período de tempo descrito.



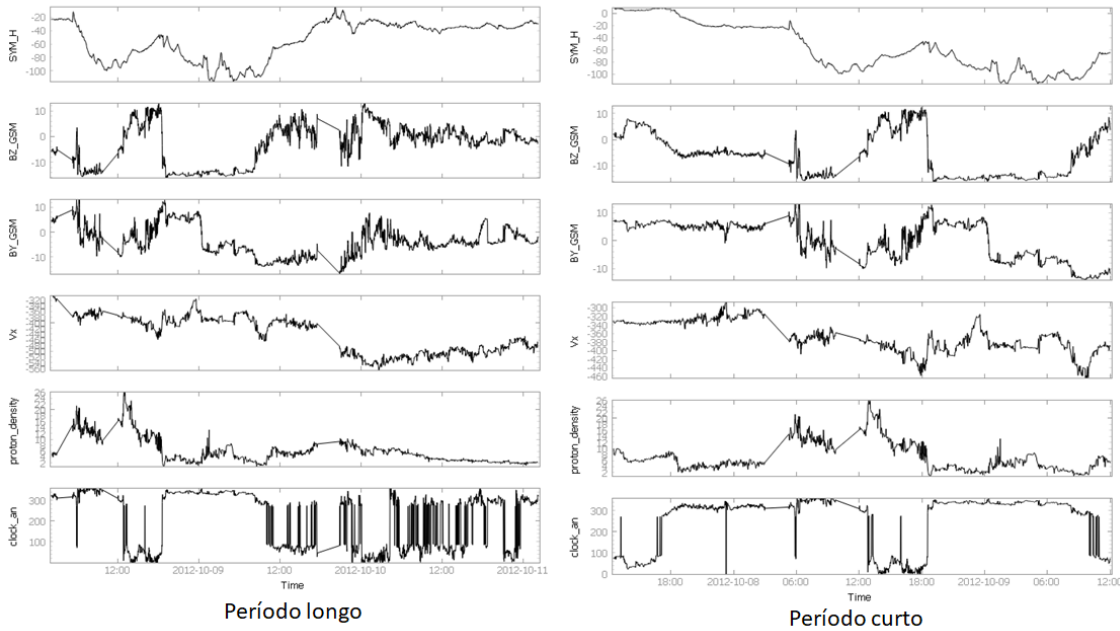
Fonte: OMNIWeb

[MORI et al., 2010](#));

- Bz: Componente Z (sistema de coordenadas GSM) do campo magnético do meio interplanetário;
- By: Componente Y (sistema de coordenadas GSM) do campo magnético do meio interplanetário;
- Vx: Componente X (sistema de coordenadas GSM) da velocidade do vento solar;
- Densidade de prótons: Densidade de prótons no vento solar;
- Clock Angle: Ângulo de incidência do campo magnético interplanetário no campo magnético terrestre.

Adicionalmente às propriedades e correlações, tratadas a partir da seção 3.3 observadas também foi estudada a causa das tempestades. Para tanto a ferramenta utilizada foi o DONKI - *The Space Weather Database Of Notifications, Knowledge, Information*, que consolida uma série de informações relacionadas à tempestades e ao clima espacial no período de tempo selecionado. Dentre as diversas funcionalidades a mais importante para este trabalho foi, como descrito pela própria ferramenta, "Links inteligentes, relacionamento, causa e efeito entre atividades do clima espacial". Através do DONKI foi possível inserir o período de tempo analisado em cada uma das 22 tempestades, identificar a tempestade magnética ocorrida dentro daquele período (como o período já estava definido e restrito previamente, na grande maioria dos casos apenas uma tempestade era identificada

Figura 14 – Propriedades analisadas nos dois períodos para a tempestade de 09/10/2012 - Evento 8. De cima para baixo: SYM-H em nT, Bz em nT, By em nT, Vx em km/s, densidade de prótons em cm^3 , clock angle em graus. Esq.: Período mais longo estudado. Dir.: Período mais curto estudado.



Fonte: Autor

pelo DONKI) e então identificar as estruturas causadoras de cada tempestade, como por exemplo as CMEs e os HSSs. (MAYS, 2016).

3.2 Análise dos dados interplanetários

Para a primeira análise foi selecionado um período de tempo de um dia antes e dois dias após o pico mínimo identificado no índice SYM-H da tempestade magnética, o intuito desta análise é entender o comportamento das 22 tempestades intensas ocorridas dentro do ciclo solar 24.

Como é possível observar nas Figuras 15, 16 e 17, referente as tempestades do dia de São Patrício de 2015 (com pico em 17/03/2015), de junho de 2013 (com pico em 01/06/2013) e de maio de 2017 (com pico em 28/05/2017), todas elas seguem um padrão de fases, como já explicado na seção 2.5, indicadas pelas linhas nas Figuras. Inicialmente observa-se o SSC, na primeira linha vermelha, e a fase inicial entre as duas primeiras linhas vermelhas, tendo uma leve perturbação positiva relacionada ao índice SYM-H, como já descrito anteriormente, a fase inicial se caracteriza por essa perturbação positiva devido à compressão da magnetosfera terrestre.

Em seguida, entre a segunda e a terceira linha vermelha, é possível observar a fase principal da tempestade magnética que é caracterizada por uma queda acentuada no

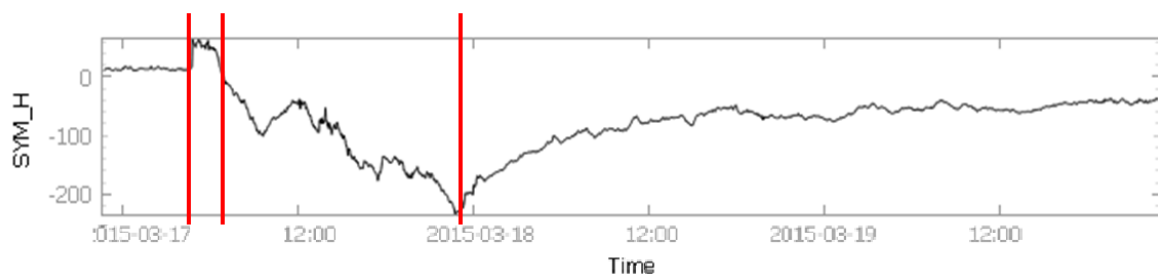
índice SYM-H, atingindo o pico negativo da tempestade. Por fim, é observado a fase de recuperação, após a terceira linha vermelha, que se caracteriza pelo aumento gradual do índice SYM-H, até que as medições geomagnéticas se estabilizam novamente próximo aos valores pré-tempestade.

É importante notar que os dados do meio interplanetário e índices geomagnéticos, tanto nas Figuras a seguir quanto em demais Figuras representadas ao longo deste documento, foram extraídos do OMNIWeb, disponibilizado pela NASA. A OMNIWeb é uma interface que proporciona uma maior integração entre estudos heliosféricos relevantes no *Goddard's Space Physics Data Facility*. Nesta interface é possível selecionar o satélite ou selecionar dados de diversos satélites complementares. A interface permite o trabalho com conjuntos de dados em diversos períodos de tempo, podendo gerar gráficos ou listas, em alguns casos existem interfaces adicionais de suporte para *scatter plots*, *fits* de regressão linear, relações cruzadas, entre outros.

Os dados utilizados possuem resolução de 1 minuto, para os parâmetros do vento solar foram usados dados compilados pelo OMNIWeb de dois satélites, sendo eles, ACE - *Advanced Composition Explorer* e WIND. Os métodos e técnicas de combinação, *timeshift*, preparação e inserção de dados não serão descritos neste trabalho, porém podem ser encontrados em [King, Papitashvili e Systems \(2021\)](#). Porém é importante citar que os dados disponibilizados pela OMNIWeb, como por exemplo dos satélites ACE e WIND, são projetados para a região do nariz da frente de choque (*bowshock*) ([PAPITASHVILI, 2009](#)).

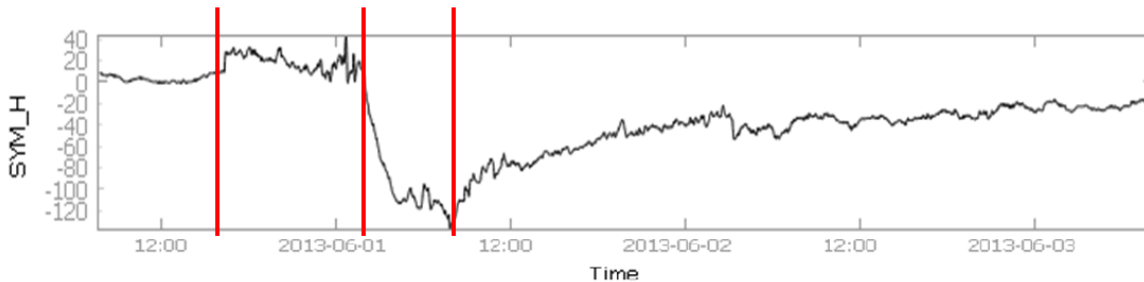
Para ambos os períodos de tempo foi necessário o uso de interpolação para os valores da componente Bz do campo magnético, já que em diversos eventos estudados houve falta de dados em algum momento. A interpolação foi feita através da rotina em Python, encontrando uma função relacionada aos dados existentes da curva e aplicando-a no período de tempo equivalente aos dados SYM-H, desta forma foi possível obter valores de Bz para cada valor de SYM-H, tornando possível a realização das correlações. A função em Python utilizada foi `scipy.interpolate.interp1d`.

Figura 15 – Índice SYM-H para tempestade do dia de São Patrício, variando de 16/03/2015 às 00:00 até 19/03/2015 às 00:00. A figura mostra a intensidade da perturbação magnética no Eixo vertical, pelo período de tempo estudado.



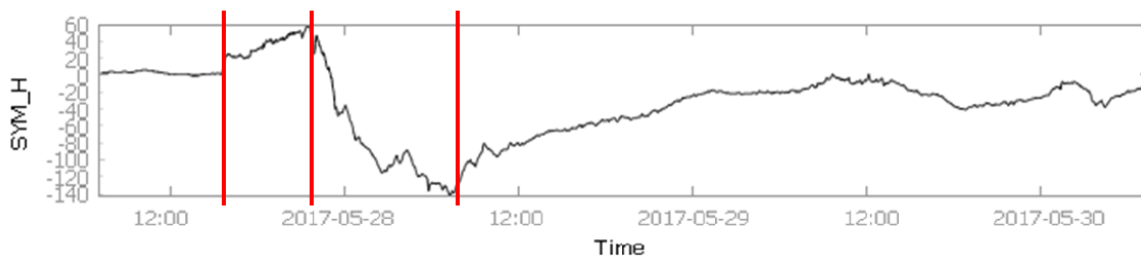
Fonte: OMNIWeb - NASA

Figura 16 – Índice SYM-H para tempestade de junho de 2013, variando de 31/05/2013 às 00:00 até 03/06/2013 às 00:00. A figura mostra a intensidade da perturbação magnética no Eixo vertical, pelo período de tempo estudado.



Fonte: OMNIWeb - NASA

Figura 17 – Índice SYM-H para tempestade de maio de 2017, variando de 27/05/2017 às 00:00 até 30/05/2017 às 00:00. A figura mostra a intensidade da perturbação magnética no Eixo vertical, pelo período de tempo estudado.



Fonte: OMNIWeb - NASA

Para a análise do período curto, como já citado anteriormente, foram utilizado dois pontos principais, o início da fase inicial, ou seja, quando as medições de SYM-H ficam positivas devido à compressão do campo magnético terrestre pelo vento solar, atingindo na casa de dezenas de nT, e a fase de recuperação abrupta, onde existe um rápido aumento das medições de SYM-H logo após o pico negativo, objeto de estudo deste trabalho.

Os dois tipos de comportamento na fase de recuperação, descrito por [Kozyra e Liemohn \(2003\)](#), podem ser divididos em abrupto e lento. Estudos indicam que a fase de recuperação abrupta, também chamada de "*early recovery*" é mais rápida, consequentemente causando um acréscimo mais rápido no índice SYM-H. Já a fase de recuperação lenta, também chamada de "*late recovery*", mostra uma variação menos acentuada do índice aos valores pré-tempestade ([CHORAGHE et al., 2021](#)).

Portanto, a escolha do ponto de corte para análise deste segundo período de tempo se deu em função da fase principal das tempestades estudadas, já que, para realização das correlações, análise de propriedades, atraso entre a componente Bz e o índice SYM-H, Clock Angle, entre outros, a opção escolhida foi reduzir ao máximo a fase de recuperação lenta, porém ainda tendo a possibilidade de analisar o comportamento inicial do retorno do índice SYM-H à normalidade durante a fase de recuperação abrupta.

Adicionalmente, similar ao estudo de [Rathore et al. \(2011\)](#), foram feitos gráficos de dispersão, bem como o cálculo da correlação simples, para as propriedades de campo magnético interplanetário total, componente Z do campo magnético interplanetário, velocidade e densidade de prótons no vento solar. Estes gráficos foram gerados com auxílio de uma rotina em Python. Também foram gerados gráficos de clock angle durante o período analisado para todos os 22 eventos estudados.

3.3 Suavização do índice SYM-H e Bz

Tendo ainda em vista os períodos das tempestades analisados anteriormente, para estudo do comportamento das tempestades e da correlação entre o campo magnético Bz e a perturbação do índice SYM-H, foi feita a suavização das curvas com a média de cinquenta pontos. Na Figura 18, referente ao dia de São Patrício de 2015, pode-se observar a diferença entre o gráfico suavizado e o gráfico original de SYM-H. O mesmo processo foi feito em relação ao Bz.

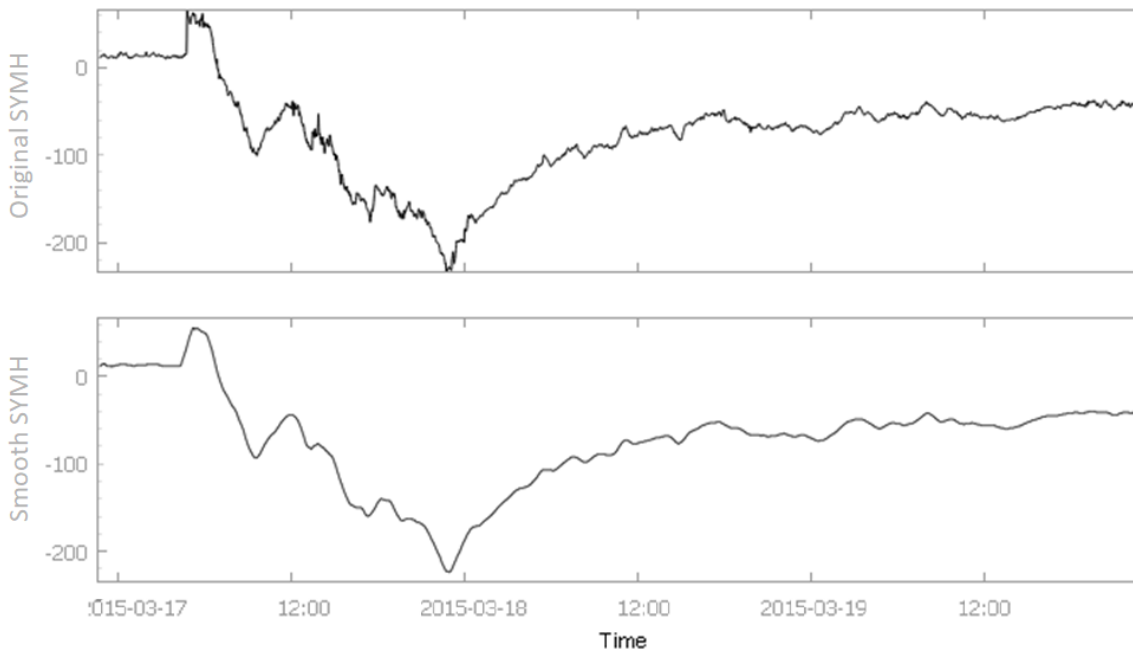
Vale ressaltar que estudos mostram que nem todas as flutuações em Bz obtém uma resposta no índice SYM-H. No artigo de [Alberti et al. \(2017\)](#), é feito a separação dos dados em frequências utilizando série de Fourier. A partir desta separação foi identificado que as flutuações com frequências mais altas são dominadas por processos internos e não diretamente relacionadas a interação com vento solar. Sendo assim a curva suavizada na Figura 18 leva em conta os dados com variações em baixa frequência, que influenciam no comportamento de SYM-H.

Uma vez realizada a suavização da curva do período analisado, passou-se a calcular a correlação entre o índice SYM-H e a componente z do campo magnético. Para tanto foram utilizados dois tipos distintos de correlação, a correlação de Pearson (ou correlação simples) e a correlação com atraso de tempo entre as curvas (ou correlação cruzada). A correlação simples, utilizada através da rotina em Python, foi executada para todas as 22 tempestades analisadas com o objetivo de identificar as similaridades de comportamento entre o índice SYM-H e a propriedade Bz. Para cada tempestade foi estudado o efeito com e sem a suavização e seu impacto na correlação, que será discutido mais adiante neste trabalho. A correlação de simples se dá pela Equação 3.1:

$$R_{ij} = \frac{C_{ij}}{\sqrt{C_{ii} \times C_{jj}}}, \quad (3.1)$$

sendo R_{ij} a matriz do coeficiente de correlação, e C a matriz de covariância entre os pontos das duas curvas. O valor do coeficiente de correlação varia de -1 até 1 , sendo -1 a mais forte correlação inversa e 1 a mais forte correlação direta ([COMMUNITY, 2021](#)).

Figura 18 – Índice SYM-H original e suavizado, respectivamente.



Fonte: OMNIWeb - NASA

Contudo, apesar da correlação simples demonstrar um valor esperado entre as similaridades das duas curvas analisadas, é preciso levar em consideração o atraso entre as medições dos aparelhos, tendo em vista que a medição da componente Bz do meio interplanetário, seja pelo ACE ou pelo WIND, acontece antes da perturbação ser registrada no índice SYM-H, na superfície da região equatorial da Terra. Além do atraso entre as medidas, é importante mencionar que a alteração em Bz medida pelo satélite, geralmente causada por alguma estrutura solar, leva um certo tempo para influenciar a dinâmica da magnetosfera terrestre, e com isso, produzir alterações na corrente anelar medidas pelo índice SYM-H. A fim de contornar essa característica de medição e obter uma melhor correlação entre os eventos estudados, além da correlação simples foi utilizada uma correlação cruzada. A correlação cruzada também foi feita através da rotina em Python e é descrita pela Equação 3.2:

$$\sum_n x_{(n+k)} \times y_n^*, \quad (3.2)$$

em que x representa a matriz de pontos da curva do SYM-H, y_n^* pelo complexo conjugado dos pontos da curva da componente Bz (como todos os pontos analisados são reais, temos que $y_n^* = y_n$), n é o índice do ponto analisado e k o atraso definido em número de pontos, como a resolução dos instrumentos utilizadas são de 1 minuto, temos que cada ponto representa esse período de tempo, então um atraso de 1 ponto equivale a um atraso de 1 minuto, para mais ou para menos, entre as curvas analisadas (TEAM, 2021).

Aqui é importante apontar uma técnica utilizada na rotina em Python. Já que os atrasos entre as curvas de todas as tempestades analisadas não foram inicialmente calculados, optou-se por gerar correlações entre todos os atrasos possíveis, identificando o melhor encaixe das curvas, ou seja, a correlação mais alta, analisando posteriormente dois pontos:

- A possibilidade do atraso com melhor correlação ser real;
- Comparação dos atrasos encontrados pela melhor correlação e calculados entre os picos mínimos nas duas curvas.

Sendo assim, o atraso entre as curvas do índice SYM-H e da componente Bz do campo magnético interplanetário foi calculado de duas formas. Primeiro calculando todos os coeficientes de correlação a partir de todos os atrasos possíveis entre as curvas e identificando o melhor (correlação mais alta), encontrando assim o melhor atraso. E calculando a diferença de tempo entre os picos mínimos de SYM-H e Bz.

4 Resultados

Inicialmente a apresentação dos resultados deste estudo foi dividido em quatro principais partes, sendo discutidos a posteriori.

- Apresentação dos eventos estudados - Seção 4.1;
- Apresentação das correlações simples entre o índice SYM-H e a propriedade Bz - Seção 4.2;
- Apresentação do atraso de tempo (calculado e observado) e correlação cruzada entre as curvas SYM-H e Bz - Seção 4.3;
- Apresentação das causas e eventos de origem das tempestades - Seção 4.4.

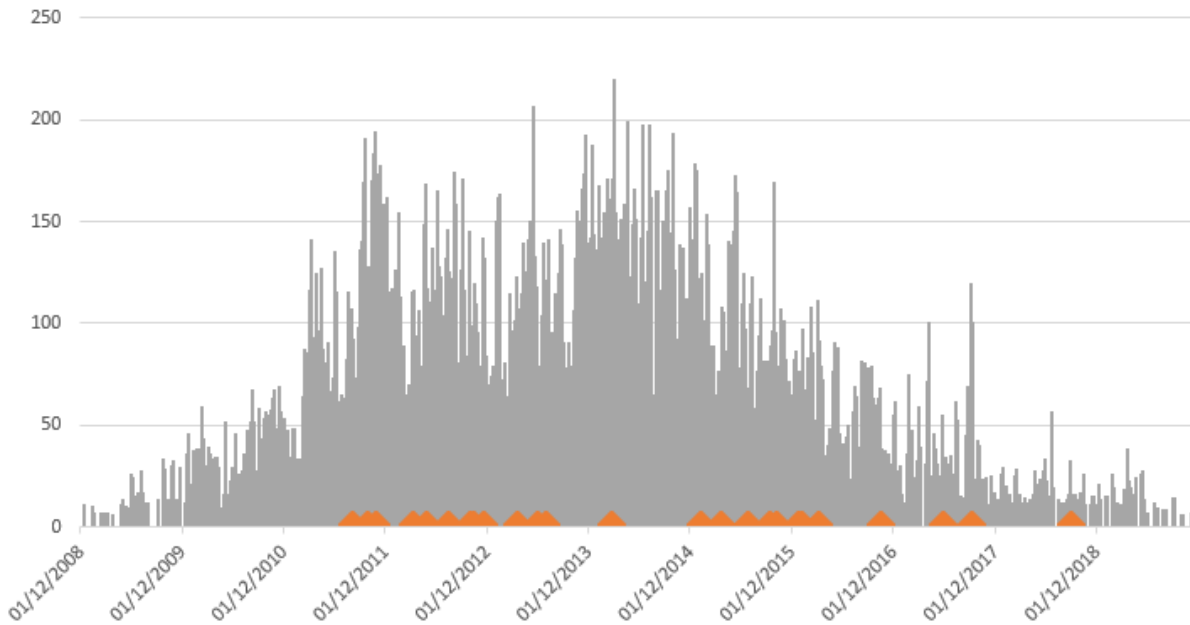
4.1 Os eventos de tempestade magnética

Como é possível observar na Tabela 2, as tempestades intensas ($< -100nT$) do ciclo solar 24 foram selecionadas entre agosto de 2011 e agosto de 2018. Na Figura 19, é possível observar o gráfico de manchas por dia de dezembro de 2008 até novembro de 2019 (cinza), assim como a ocorrência de todas as tempestades com índice SYM-H $\leq -100nT$ neste mesmo período, identificados por triângulos laranjas.

Como mostra a Figura 20, que mostra o número de manchas entre os anos de 2008 e 2019, o número de manchas solares aumenta constantemente até o ano de 2014, onde começa a decair. A relação entre as manchas solares e a atividade solar, já citada nesse trabalho anteriormente na Seção 2, é observada nos dados encontrados.

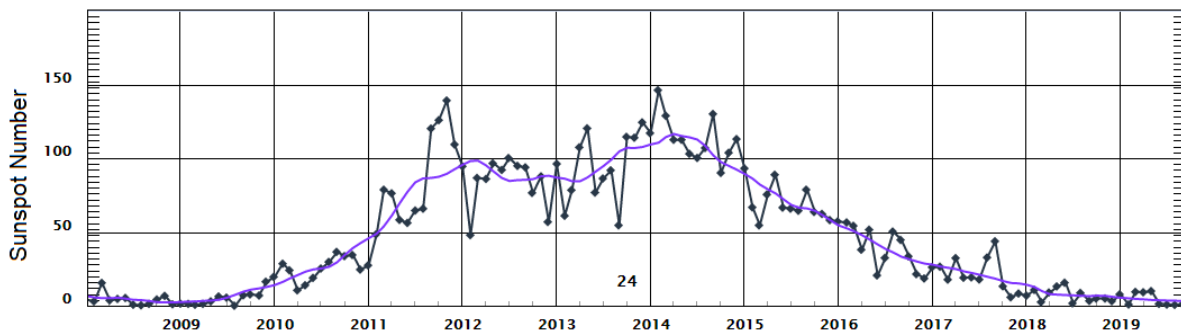
A partir dos métodos descritos na Seção 3, o intuito foi analisar, dentro dos períodos de tempo curto e longo, a correlação entre as curvas do índice SYM-H e da propriedade Bz. A partir dos gráficos da Figura 21, é possível, antes de uma análise numérica e crítica, observar pela linha do tempo que as curvas são similares. Um ponto importante, e que será abordado adiante, é o atraso de tempo dos picos mínimos observados entre as medições do índice SYM-H e componente Bz do campo magnético, ou seja, apesar de similares, as curvas apresentam uma defasagem temporal entre elas.

Figura 19 – Gráfico de número de manchas solares por dia (eixo horizontal) entre dezembro de 2008 e novembro de 2019 (cinza) e tempestades com índice SYM-H $\geq -100nT$ no mesmo período, identificados por triângulos laranjas



Fonte: Autor

Figura 20 – Gráfico de manchas solares no ciclo 24. Eixo vertical representa a quantidade de manchas solares, eixo horizontal o período de tempo do ciclo solar estudado. A linha roxa é a linha de valores suavizados, já a preta e os pontos mostram o número total de manchas mensais



Fonte: NOAA (2021b)

4.2 Correlação Simples

Com o desenvolvimento de uma rotina em Python, foi possível calcular a correlação entre as curvas de SYM-H e da componente Bz do campo magnético interplanetário, sendo possível compreender melhor e de forma mais embasada a real correlação entre o vento solar, com a propriedade Bz, e as perturbações do campo geomagnéticas sentidas na superfície da Terra.

A tabela 3, mostra o resultado das correlações simples e correlações simples com curvas suavizadas entre Bz e SYM-H para o período longo de análise desse estudo,

Tabela 2 – Tabela com valores e datas de mínimos SYM-H e Bz. As colunas representam, respectivamente, o número do evento de tempestade de acordo com a Tabela 1, as datas do pico mínimo do SYM-H, intensidade no SYM-H, datas de pico mínimo do Bz, intensidade do pio mínimo de Bz.

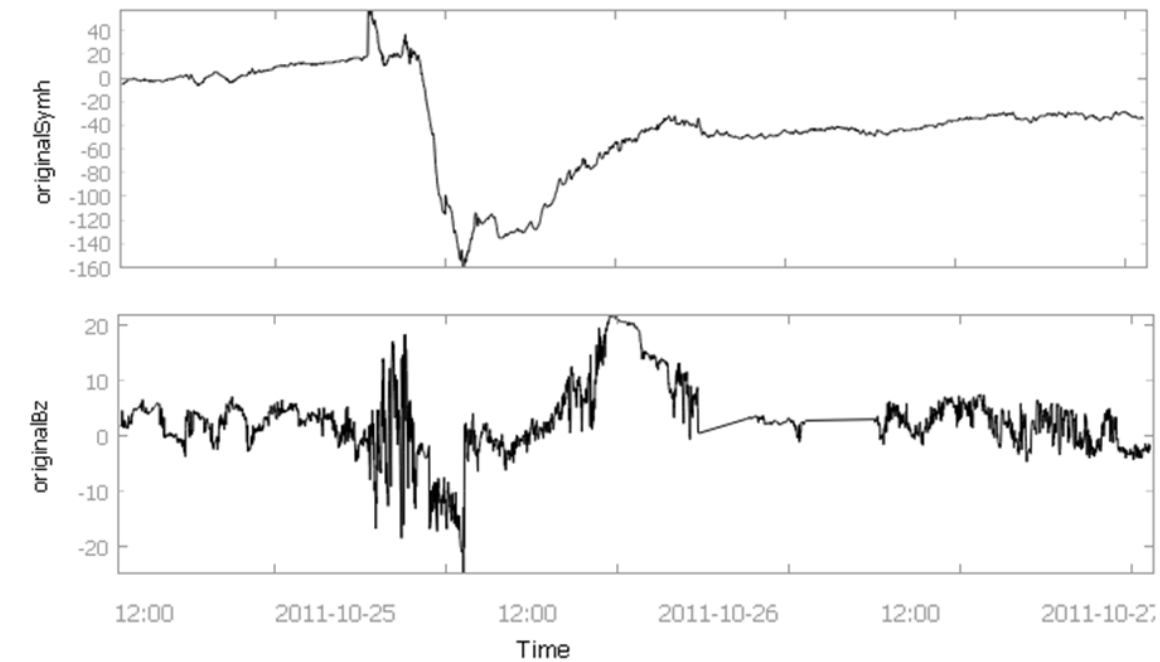
Evento	Data mínimo SYM-H	SYM-H (nT)	Data mínimo Bz	Bz (nT)
1	06/08/2011 03:22	-126,00	05/08/2011 20:04	-22,80
2	26/09/2011 21:19	-116,00	26/09/2011 19:08	-33,74
3	25/10/2011 01:15	-160,00	25/10/2011 01:13	24,72
4	09/03/2012 08:13	-150,00	09/03/2012 04:34	-18,55
5	24/04/2012 03:26	-125,00	23/04/2012 18:18	-15,94
6	15/07/2012 10:04	-123,00	15/07/2012 09:22	-20,04
7	01/10/2012 03:52	-138,00	01/10/2012 01:36	-20,88
8	09/10/2012 02:10	-116,00	08/10/2012 19:06	-16,04
9	14/11/2012 07:27	-118,00	14/11/2012 03:36	-19,17
10	17/03/2013 20:28	-132,00	17/03/2013 08:22	-19,34
11	01/06/2013 07:48	-137,00	01/06/2013 01:34	-21,21
12	29/06/2013 06:34	-111,00	29/06/2013 05:23	-12,32
13	07/01/2015 11:00	-135,00	07/01/2015 09:38	-20,67
14	17/03/2015 22:47	-234,00	17/03/2015 13:07	-26,00
15	23/06/2015 04:24	-208,00	22/06/2015 19:23	-39,03
16	20/12/2015 22:49	-170,00	20/12/2015 22:01	-17,95
17	01/01/2016 01:07	-117,00	31/12/2015 20:10	-16,21
18	06/03/2016 21:20	-110,00	06/03/2016 18:11	-17,96
19	13/10/2016 23:45	-114,00	13/10/2016 16:42	-21,30
20	28/05/2017 07:13	-142,00	28/05/2017 00:14	-20,28
21	08/09/2017 01:08	-146,00	07/09/2017 23:36	-31,16
22	26/08/2018 07:11	-206,00	26/08/2018 05:08	-18,10

Fonte: Autor

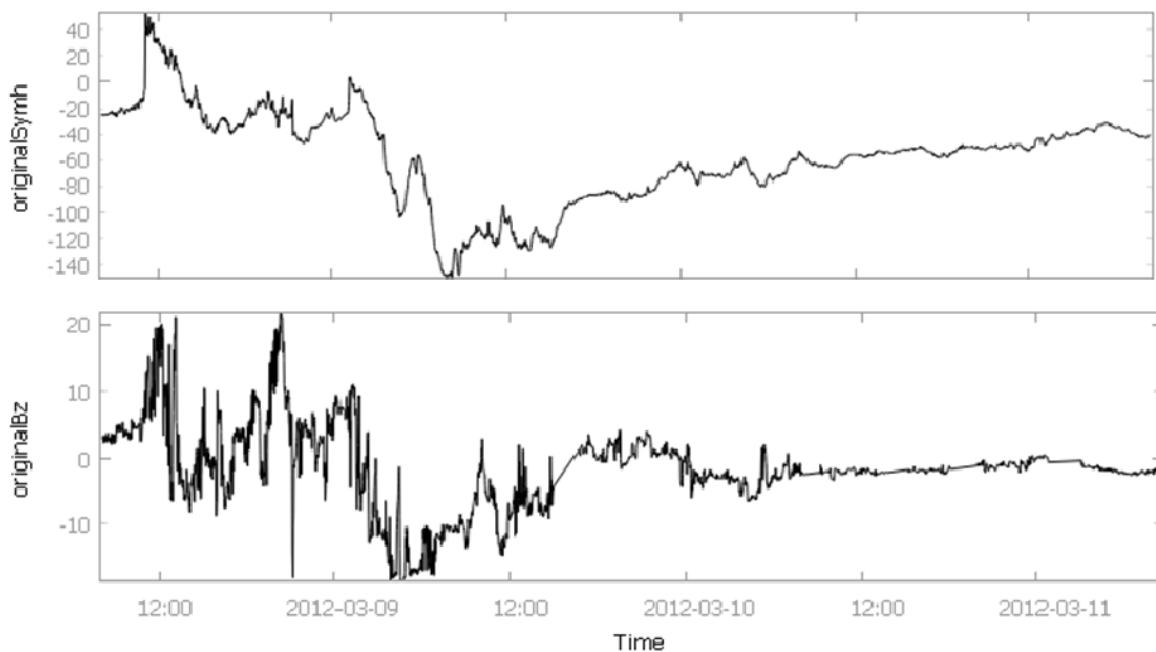
ou seja, o período que abrange desde a normalidade do índice SYM-H até meados da fase de recuperação lenta, dias depois. Essa análise, por abranger um longo tempo sem atividade magnética que caracteriza uma tempestade intensa (seguindo o mesmo critério usado por [Gonzalez et al. \(1994\)](#) de $SYM-H \leq -100nT$) como mostrado na Figura 22 (referente ao índice SYM-H no da tempestade de outubro de 2011, com pico mínimo em 25/10/2011), levou em conta um período "calmo" de quase 12 horas (SYM-H próximo de 0), bem como um período de 2 dias de recuperação lenta com o índice se mantendo aproximadamente constante. Sendo assim, a discussão dos resultados foi feita a partir da análise das perturbações no período curto desse estudo, focando na fase principal das tempestades.

Os resultados das correlações as quais foram utilizados o período de tempo curto mencionado neste estudo, que tem início no começo da fase inicial da tempestade até a fase de recuperação abrupta, para todas as tempestades estão dispostos na Tabela 4. Vale ressaltar a forma com que o coeficiente de correlação simples utilizado é interpretado de forma que quanto mais próximo de 1 maior a correlação direta, quanto mais próximo de -1

Figura 21 – Gráficos de SYM-H e Bz, respectivamente, das tempestades 3 e 4. Demonstrando a intensidade de ambos dentro do período de tempo analisado para cada evento.



Tempestade 3



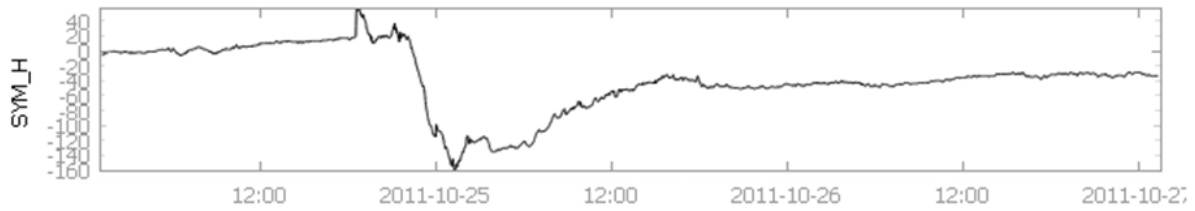
Tempestade 4

Fonte: Autor

maior a correlação inversa.

Em geral os resultados apresentaram correlações relativamente fortes e positivas,

Figura 22 – Gráfico de SYM-H da tempestades 3 de outubro de 2011, com pico mínimo em 25/10/2011.



Fonte: Autor

Tabela 3 – Correlação utilizando dados reais e suavizados para SYM-H e Bz durante os eventos de tempestade magnética no período mais longo estudado. As colunas representam respectivamente as datas de início e final longo, correlação simples e correlação simples suavizada. As linhas demonstram os valores para cada evento estudado.

Index	Data (início longo)	Data (final longo)	Corr Simples	Corr Simples Suavizada
1	2011-08-05	2011-08-08	-0.14	-0.17
2	2011-09-25	2011-09-29	0.31	0.44
3	2011-10-24	2011-10-27	0.11	0.13
4	2012-03-08	2012-03-11	0.57	0.65
5	2012-04-23	2012-04-26	0.33	0.36
6	2012-07-14	2012-07-17	0.80	0.85
7	2012-09-30	2012-10-03	0.25	0.24
8	2012-10-07	2012-10-11	0.57	0.50
9	2012-11-12	2012-11-17	0.57	0.61
10	2013-03-16	2013-03-19	0.30	0.32
11	2013-05-31	2013-06-03	0.30	0.37
12	2013-06-27	2013-07-01	0.66	0.70
13	2015-01-06	2015-01-10	0.09	0.15
14	2015-03-16	2015-03-19	0.63	0.71
15	2015-06-21	2015-06-24	0.16	0.19
16	2015-12-18	2015-12-22	0.75	0.80
17	2015-12-31	2016-01-04	0.55	0.62
18	2016-03-05	2016-03-08	0.58	0.67
19	2016-10-12	2016-10-15	0.73	0.75
20	2017-05-27	2017-05-30	0.43	0.42
21	2017-09-07	2017-09-13	0.30	0.34
22	2018-08-25	2018-08-28	0.69	0.73

Fonte: Autor

tanto com a suavização quanto sem ela, indicando uma relação entre os dois parâmetros, porém em algumas tempestades, 1, 10, 13, 15 e 21, foi observado um coeficiente negativo ou muito próximo de nulo, indicando resultados pouco esperadas de acordo com a literatura estudada, como [Rathore et al. \(2011\)](#) em seu estudo correlacional entre as propriedades do vento solar e campo magnético interplanetário com tempestades geomagnéticas.

A média simples dos coeficientes de correlação entre todas as tempestades estudadas apresentou um resultado de 0,43 com as curvas não suavizadas. A suavização das curvas, eliminando picos de frequências mais altas, como já explicado anteriormente, em

Tabela 4 – Correlação utilizando dados reais e suavizados para SYM-H e Bz durante os eventos de tempestade magnética. As colunas representam respectivamente a data de pico mínimo do SYM-H, intensidade do SYM-H, correlação simples e correlação simples suavizada. As linhas demonstram os valores para cada evento estudado.

Evento	Data mínimo SYM-H	SYM-H (nT)	Corr Simples	Corr Simples Suavizada
1	06/08/2011 03:22	-126,00	-0,35	-0,48
2	26/09/2011 21:19	-116,00	0,23	0,43
3	25/10/2011 01:15	-160,00	0,46	0,62
4	09/03/2012 08:13	-150,00	0,66	0,75
5	24/04/2012 03:26	-125,00	0,41	0,42
6	15/07/2012 10:04	-123,00	0,76	0,89
7	01/10/2012 03:52	-138,00	0,64	0,70
8	09/10/2012 02:10	-116,00	0,48	0,42
9	14/11/2012 07:27	-118,00	0,68	0,74
10	17/03/2013 20:28	-132,00	-0,07	-0,03
11	01/06/2013 07:48	-137,00	0,49	0,54
12	29/06/2013 06:34	-111,00	0,74	0,77
13	07/01/2015 11:00	-135,00	-0,29	-0,33
14	17/03/2015 22:47	-234,00	0,63	0,73
15	23/06/2015 04:24	-208,00	-0,23	-0,25
16	20/12/2015 22:49	-170,00	0,69	0,88
17	01/01/2016 01:07	-117,00	0,36	0,42
18	06/03/2016 21:20	-110,00	0,62	0,74
19	13/10/2016 23:45	-114,00	0,87	0,89
20	28/05/2017 07:13	-142,00	0,76	0,77
21	08/09/2017 01:08	-146,00	0,02	0,04
22	26/08/2018 07:11	-206,00	0,83	0,83

Fonte: Autor

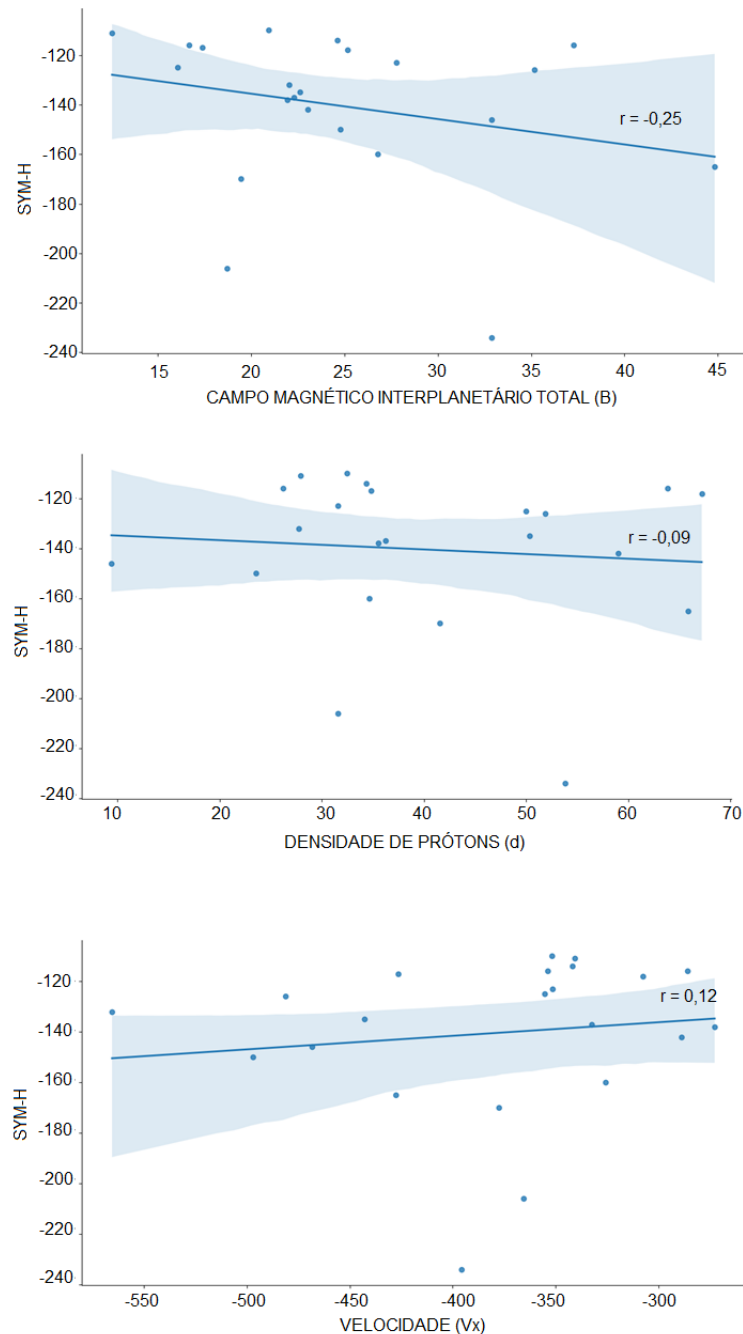
geral melhorou todas as correlações, como esperado. Considerando apenas os eventos que apresentaram uma correlação positiva entre a componente Bz do campo magnético interplanetário e o índice SYM-H, $r > 0$ sem a aplicação do atraso, apenas na tempestade 8 foi observado um decréscimo do coeficiente de correlação e na tempestade 22 o coeficiente se manteve o mesmo, quando comparado os valores com suavização e sem suavização.

Para as seis tempestades mais intensas estudadas ($\text{SYM-H} \leq -150\text{nT}$) observou-se uma média simples de coeficiente de correlação de 0,51, enquanto para as demais tempestades estudadas essa média ficou em 0,41. Excluindo as tempestades que apresentaram um valor de coeficiente de correlação simples $r \leq 0$ (estas foram a tempestade 15 para $\text{SYM-H} \leq -150\text{nT}$, e as tempestades 1, 10, 13 e 21 para $\text{SYM-H} \geq -150\text{nT}$) temos respectivamente para as tempestades mais intensas um coeficiente de correlação igual a 0,65 e para as menos intensas 0,59. Nos dois casos as tempestades mais intensas demonstraram uma correlação mais forte entre a componente Bz do campo magnético do vento solar e o índice de perturbação SYM-H.

Adicionalmente foram gerados gráficos de dispersão e calculada a correlação entre os picos mínimos de SYM-H e máximos das propriedades de campo magnético interplanetário total, velocidade (V_x) e densidade de prótons. Os resultados podem ser observados nas

Figuras 23.

Figura 23 – Gráfico de dispersão e valor do coeficiente de correlação simples entre os valores mínimos de SYM-H (eixo vertical) e os valores máximos de, respectivamente de cima para baixo, campo magnético interplanetário total, densidade de prótons e componente x da velocidade, para todas as 22 tempestades estudadas.



Fonte: Autor

O valor do coeficiente de correlação para o campo magnético interplanetário total ($r = -0,25$) ficou substancialmente abaixo do identificado na literatura (para [Rathore et al. \(2011\)](#) $r = -0,71$). O valor de coeficiente de correlação entre SYM-H e densidade de prótons foi de $r = -0,09$, também abaixo do esperado ([Mansilla \(2008\)](#) encontrou

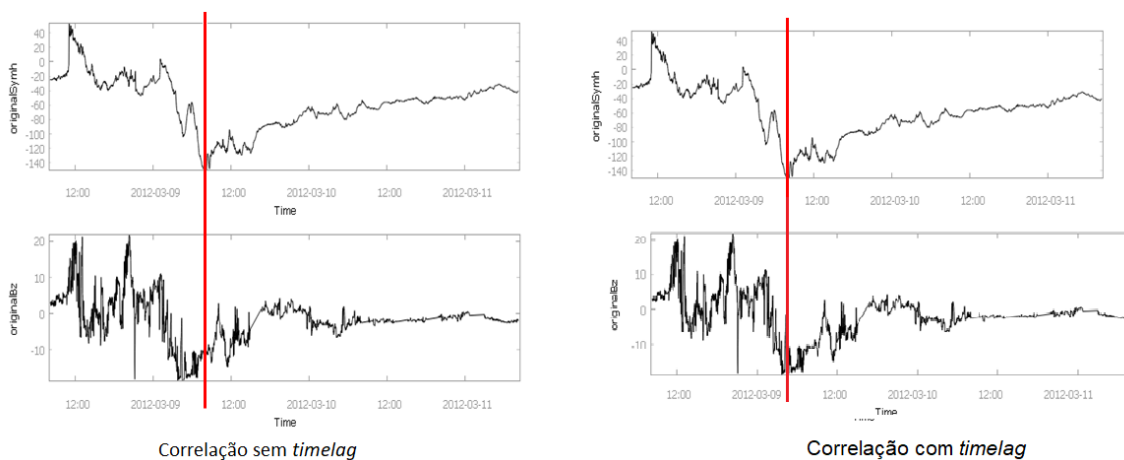
$r = 0,17$), porém uma explicação possível é de que o aumento da densidade, usualmente, ocorre na fase inicial ou antes dela, como o objeto deste estudo foi a fase principal, isso pode esclarecer o resultado obtido para a correlação (MANSILLA, 2008). Para o valor do coeficiente de correlação da velocidade obteve-se $r = 0,13$, resultado esse próximo do encontrado por Mansilla (2008) ($r = 0,19$), porém distante de Rathore et al. (2011) (0,36).

4.3 Correlação Cruzada

Como discutido anteriormente na Seção 4.2, algumas tempestades estudadas apresentaram valores de correlação discrepantes da relação encontrada na literatura, como nos estudos de Rathore et al. (2011) e Subedi, Adhikari e Mishra (2017), que apresentam uma correlação positiva entre Bz e SYM-H, portanto aplicou-se, com auxílio de uma rotina em Python, o deslocamento das curvas em relação à linha do tempo, ou seja, comparou-se pontos de cada curva em momentos diferentes a fim de encontrar a melhor correlação.

Esse processo, apesar de ter sido desenvolvido e calculado em Python, pode ser observado de maneira ilustrativa pela Figura 24, que representa a correlação simples entre valores de Bz e SYM-H e a correlação cruzada com atraso da curva de Bz em relação à curva de SYM-H. A linha vermelha mostra a defasagem entre os picos mínimos de cada curva na imagem à esquerda e a sincronização dos picos mínimos com o atraso na imagem à direita. Na rotina em Python foram calculados os coeficientes de correlação para todos os atrasos possíveis entre os pontos das duas curvas para as 22 tempestades estudadas.

Figura 24 – Figura ilustrativa de comparação de pontos com atraso. Esq.: comparação de pontos simples, dir.: comparação de pontos com atraso aplicado entre índice SYM-H e componente Bz do campo magnético.

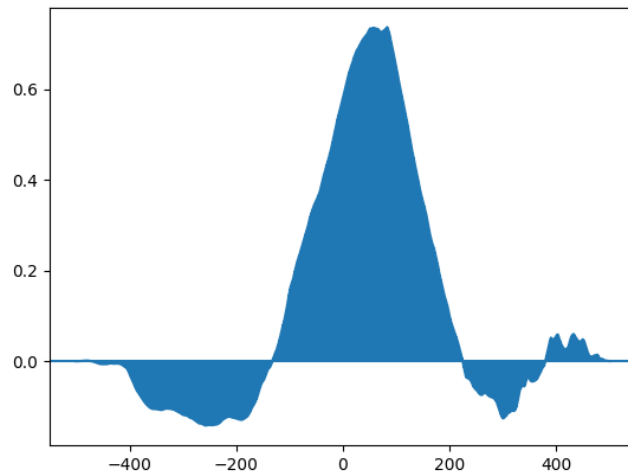


Fonte: Autor

A Figura 25 mostra o comportamento do coeficiente de correlação quando aplicado os atrasos para um evento de tempestade magnética. O eixo horizontal representa o atraso aplicado e o eixo vertical o valor do coeficiente de correlação encontrada para tal atraso

entre as curvas de Bz e SYM-H. Nesse caso, a melhor correlação foi de 0,74 para um atraso de 40 minutos.

Figura 25 – Exemplo de comportamento da correlação cruzada em uma tempestade. O eixo vertical representa o valor do coeficiente de correlação e o eixo horizontal o valor do atraso aplicado.



Fonte: Autor

Os resultados das melhores correlações são observados na Tabela 6, que apresenta os valores de correlação cruzada para cada tempestade no período mais curto de tempo, entre o início da fase inicial e a fase de recuperação abrupta, assim como os resultados para as correlações mediante as curvas suavizadas. Da mesma forma que feito para a correlação simples, também foram calculados os coeficientes de correlação cruzada para todas as tempestades no período longo, ou seja, antes do início da fase inicial da tempestade até meados da fase de recuperação lenta, visto na Tabela 5. Pelo mesmo motivo apresentado anteriormente na seção 4.2, a discussão dos resultados foi baseada no critério de período de duração curto empregado neste estudo, centralizando a análise dos resultados na fase principal das tempestades.

Para a correlação cruzada a partir das curvas sem suavização foram percebidos valores altos de correlação, com todos os coeficientes maiores que 0,4, a menos da tempestade 15 que obteve um valor bem abaixo das demais com 0,26. A média simples do coeficiente de correlação cruzada sem suavização ficou em 0,75, já a mesma média com as curvas suavizada em 0,79. Todas as tempestades tiveram um acréscimo ou mantiveram a mesma correlação após a suavização das curvas.

A média simples das correlações das tempestades mais intensas ($\text{SYM-H} \leq -150nT$) ficou em 0,65, já para as demais tempestades em 0,78. Com a suavização os coeficientes ficaram em 0,74 e 0,81 respectivamente. Ao contrário do obtido na Seção 4.2, as tempestades mais intensas apresentaram uma média de correlação menor. Os resultados obtidos da

Tabela 5 – Correlação cruzada utilizando dados reais e suavizados para SYM-H e Bz durante os eventos de tempestade magnética. As colunas representam respectivamente as datas de início longo e final longo, correlação cruzada e correlação cruzada suavizada. As linhas demonstram os valores para cada evento estudado.

Index	Data (início longo)	Data (final longo)	Corr Cruzada	Corr Cruzada Suavizada
1	2011-08-05	2011-08-08	0.19	0.35
2	2011-09-25	2011-09-29	0.35	0.40
3	2011-10-24	2011-10-27	0.04	0.04
4	2012-03-08	2012-03-11	0.54	0.57
5	2012-04-23	2012-04-26	0.66	0.70
6	2012-07-14	2012-07-17	0.93	0.96
7	2012-09-30	2012-10-03	0.30	0.31
8	2012-10-07	2012-10-11	0.64	0.67
9	2012-11-12	2012-11-17	0.56	0.59
10	2013-03-16	2013-03-19	0.12	0.14
11	2013-05-31	2013-06-03	0.46	0.55
12	2013-06-27	2013-07-01	0.86	0.88
13	2015-01-06	2015-01-10	0.04	0.07
14	2015-03-16	2015-03-19	0.66	0.70
15	2015-06-21	2015-06-24	0.22	0.25
16	2015-12-18	2015-12-22	0.84	0.87
17	2015-12-31	2016-01-04	0.65	0.72
18	2016-03-05	2016-03-08	0.52	0.60
19	2016-10-12	2016-10-15	0.77	0.79
20	2017-05-27	2017-05-30	0.61	0.64
21	2017-09-07	2017-09-13	0.41	0.45
22	2018-08-25	2018-08-28	0.76	0.79

Fonte: Autor

correlação estão em ordem com o encontrado na literatura com estudos similares já realizados. No trabalho de Pokharia et al. (2018) a correlação encontrada entre a componente Bz e o índice DST (similar ao SYM-H como já explicado na Seção 2) foi de 0,8.

Os atrasos, obtidos como explicado na Figura 25, podem ser observados na Tabela 7, junto com o que seriam os atrasos calculados, ou Δ de tempo entre SYM-H e Bz, que foram inferidos utilizando a diferença de tempo entre o pico mínimo da componente Bz e do SYM-H.

Algumas considerações importantes referentes a estes resultados e a Tabela 7. Primeiramente, é possível observar que as medições de "melhor atraso", ou seja, o atraso com o maior coeficiente de correlação, para as tempestades 4, 6, 12 e 16 deram igual a 0, ou seja, a melhor correlação foi encontrada sem nenhum atraso. É de se esperar que houvesse um atraso entre os valores devido ao posicionamento do satélite fornecedor dos dados do campo magnético interplanetário e as estações que realizam os dados do SYM-H em Terra, sendo assim, apesar da correlação ser a melhor, não se pode ter como absolutamente precisa. Por outro lado, o comportamento da curva de correlação em relação aos atrasos aplicados é, em geral, como o demonstrado na Figura 25, tendo isso em vista, o valor real do atraso entre as curvas em minutos não é de ser muito discrepante quando em comparação com os valores encontrados através da melhor correlação possível.

Tabela 6 – Valores de correlação cruzada e correlação cruzada suavizada para cada tempestade no período curto. As colunas representam respectivamente data do pico mínimo do SYM-H, intensidade do pico mínimo do SYM-H, coeficiente de correlação cruzada e coeficiente de correlação cruzada suavizada. As linhas representam os eventos estudados.

Evento	Data mínimo SYM-H	SYM-H (nT)	Corr Cruzada	Corr Cruzada Suavizada
1	06/08/2011 03:22	-126,00	0,43	0,49
2	26/09/2011 21:19	-116,00	0,46	0,53
3	25/10/2011 01:15	-160,00	0,74	0,90
4	09/03/2012 08:13	-150,00	0,57	0,62
5	24/04/2012 03:26	-125,00	0,83	0,86
6	15/07/2012 10:04	-123,00	0,81	0,86
7	01/10/2012 03:52	-138,00	0,94	0,95
8	09/10/2012 02:10	-116,00	0,81	0,82
9	14/11/2012 07:27	-118,00	0,71	0,74
10	17/03/2013 20:28	-132,00	0,82	0,88
11	01/06/2013 07:48	-137,00	0,84	0,87
12	29/06/2013 06:34	-111,00	0,85	0,86
13	07/01/2015 11:00	-135,00	0,93	0,93
14	17/03/2015 22:47	-234,00	0,80	0,82
15	23/06/2015 04:24	-208,00	0,26	0,28
16	20/12/2015 22:49	-170,00	0,63	0,94
17	01/01/2016 01:07	-117,00	0,71	0,72
18	06/03/2016 21:20	-110,00	0,66	0,66
19	13/10/2016 23:45	-114,00	0,96	0,96
20	28/05/2017 07:13	-142,00	0,86	0,87
21	08/09/2017 01:08	-146,00	0,93	0,94
22	26/08/2018 07:11	-206,00	0,88	0,88

Fonte: Autor

Por fim, ainda sobre o melhor atraso, o valor médio entre todas as tempestades analisadas foi de 103 minutos, sendo condizente com resultados de [Gonzalez e Echer \(2005\)](#), que encontrou o um delta similar ($\approx 2h$) na análise entre a mesma componente Bz e o índice DST (equivalente ao SYM-H) em tempestades magnéticas com $DST \leq -85nT$. Ou seja, o tempo de resposta até o pico negativo do DST (*/approx2h*).

Também é válido citar a ocorrência de falta de dados. Inicialmente, como observado na Figura 26, temos um comportamento linear da curva da propriedade Bz da tempestade 21. Esse comportamento linear não corresponde com a realidade. Durante o início do dia 09/09/2017, seção destacada em vermelho, os satélites utilizados pelo OMNIWeb para a captura de dados, neste caso WIND e ACE, não tiveram os dados disponibilizados, afetando o processamento para geração da correlação pela rotina em Python. Para a geração do coeficiente de correlação, tanto para a correlação simples, quanto para a correlação cruzada, é necessário interpolar os dados para as medições do índice SYM-H e propriedade Bz terem o mesmo número de pontos, portanto a linearidade originada pela interpolação dos valores afeta a correlação percebida. Na Figura 27, observa-se o gráfico real de Bz, sem os pontos interpolados, retirado da ferramenta OMNIWeb para o mesmo período de tempo. Para a tempestade descrita na Figura supracitada, o período sem dados não foi incluso na

Tabela 7 – Valores do melhor atraso a partir da correlação cruzada e diferença de tempo em minutos entre o pico mínimo do SYM-H e pico mínimo do Bz. Cada linha representa um evento estudado.

Evento	Data mínimo SYM-H	Melhor atraso (min)	Δ SYM-H Bz
1	06/08/2011 03:22	419	438
2	26/09/2011 21:19	147	131
3	25/10/2011 01:15	83	2
4	09/03/2012 08:13	0	219
5	24/04/2012 03:26	240	548
6	15/07/2012 10:04	0	42
7	01/10/2012 03:52	72	136
8	09/10/2012 02:10	153	424
9	14/11/2012 07:27	40	231
10	17/03/2013 20:28	104	726
11	01/06/2013 07:48	80	374
12	29/06/2013 06:34	0	71
13	07/01/2015 11:00	57	82
14	17/03/2015 22:47	23	580
15	23/06/2015 04:24	433	541
16	20/12/2015 22:49	0	48
17	01/01/2016 01:07	41	297
18	06/03/2016 21:20	121	189
19	13/10/2016 23:45	140	423
20	28/05/2017 07:13	85	419
21	08/09/2017 01:08	15	92
22	26/08/2018 07:11	18	123

Fonte: Autor

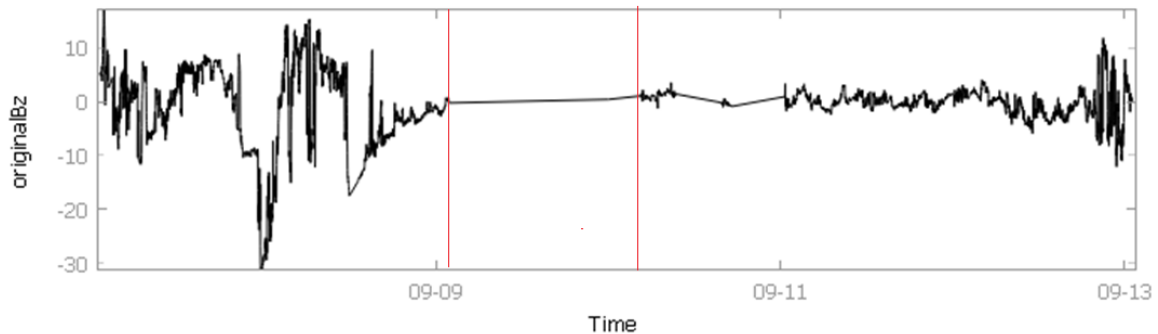
geração da correlação, porém é de se esperar que alguns períodos sem dados tenham sido inclusos na geração de correlação nas demais tempestades, apesar de não terem a mesma longa duração deste.

Algumas das tempestades que apresentaram resultados destoantes sem aplicação do atraso tiveram seus respectivos coeficientes de correlação ampliados de forma acentuada após a aplicação de tal atraso, levando a crer que a correlação extraordinária observada deveu-se a, principalmente, dessincronização das curvas. Este foi o caso das tempestades 1, 10, 13 e 21. A tempestade 15 também teve seu coeficiente acrescido, porém ainda demonstrou uma correlação fraca em comparação com as demais.

4.4 Causas e origens das tempestades estudadas

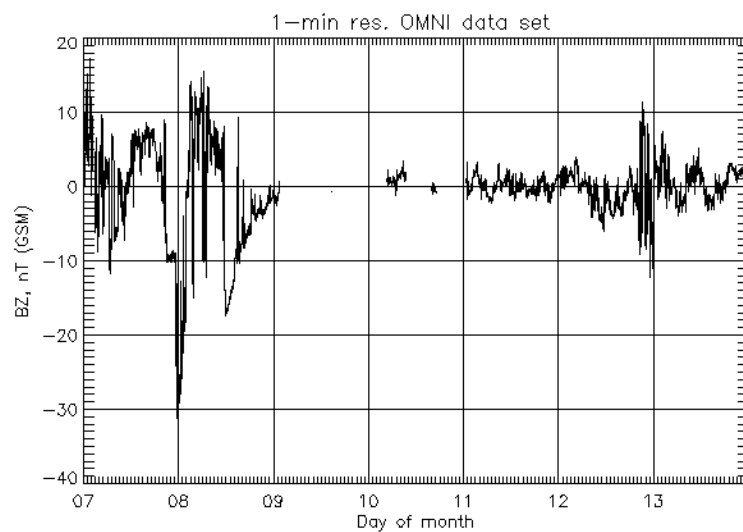
Além do estudo das correlações entre a componente Z do campo magnético do vento solar e as perturbações observadas no índice SYM-H, também analisou-se à ocorrência de

Figura 26 – Propriedade Bz do vento solar causador da tempestade 21 de 08/09/2017. Eixo vertical representando a intensidade da componente Bz do campo magnético e eixo horizontal o período de tempo estudado.



Fonte: Autor

Figura 27 – Propriedade Bz do vento solar causador da tempestade 21 de 08/09/2017 retirada da OMNIWeb sem interpolação. Eixo vertical representando a intensidade da componente Bz do campo magnético e eixo horizontal o período de tempo estudado.



Fonte: OMNIWeb

estruturas solares relacionadas às tempestades observadas. Como explicitado no Capítulo 3, através da ferramenta DONKI, foi possível encontrar os eventos que são possivelmente relacionados, sejam eles causa ou consequência, das tempestades. Na Tabela 8, é possível identificar as estruturas presentes no vento solar, assim como data e hora. A coluna Eventos Donki mostra os eventos descritos conforme nomenclatura da lista Donki, muitas vezes detectados por vários satélites diferentes, e a coluna Eventos mostra apenas a estrutura solar que está relacionada à tempestade. É importante pontuar que os eventos estão descritos a partir de siglas comumente utilizadas no meio.

- CME - *Coronal Mass Ejection* ou Ejeção de Massa Coronal, em português;

- HSS - *High Speed Streams* ou Feixe de Vento Solar Rápido, em português;
- IPS - *Interplanetary Shock* ou Choque Interplanetário, em português.

Tabela 8 – Tabela de eventos identificados relacionados às tempestades. As colunas representam respectivamente a data do pico mínimo do SYM-H, a intensidade do pico mínimo do SYM-H, o(s) evento(s) relacionado(s) pelo DONKI a cada tempestade estudada, o(s) evento(s) de maneira resumida.

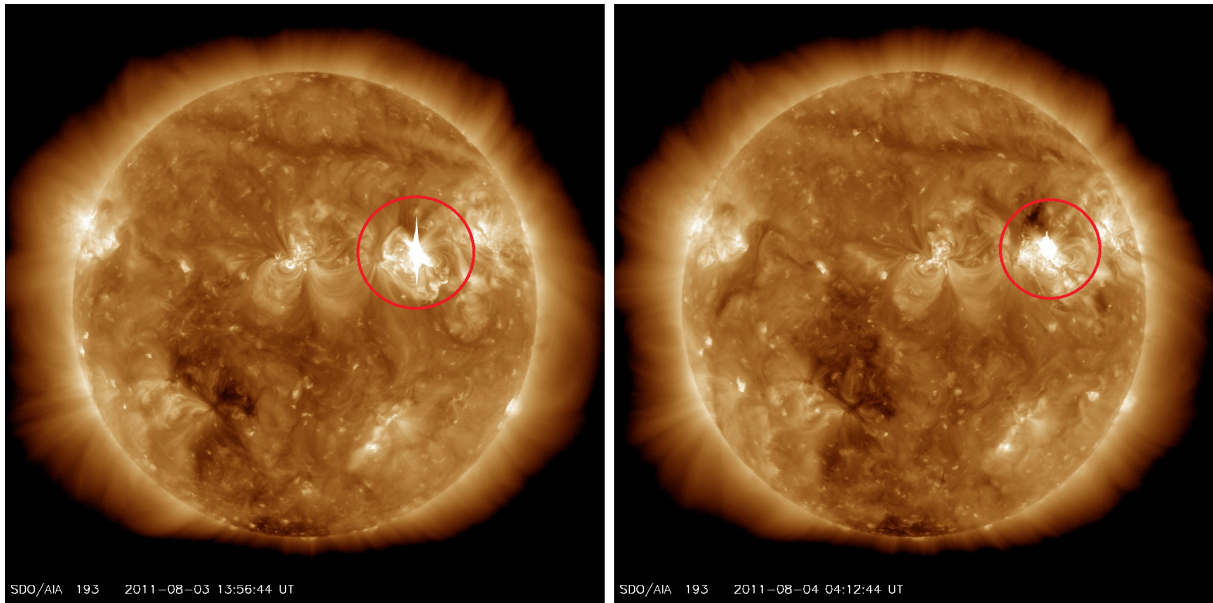
Evento	Data mínimo SYM-H	Mínimo SYM-H (nT)	Eventos relacionados DONKI	Eventos relacionados
1	06/08/2011 03:22	-126,00	2011-08-03T13:55:00-CME-001 2011-08-04T04:10:00-CME-001	CME
2	26/09/2011 21:19	-116,00	2011-09-24T13:09:00-CME-001	CME
3	25/10/2011 01:15	-160,00	2011-10-22T01:36:00-CME-001	CME
4	09/03/2012 08:13	-150,00	2012-03-05T04:00:00-CME-001	CME
5	24/04/2012 03:26	-125,00	2012-04-19T15:39:00-CME-001 2012-04-23T02:27:00-IPS-001	CME IPS
6	15/07/2012 10:04	-123,00	2012-07-12T16:54:00-CME-001 2012-07-14T17:26:00-IPS-001	CME IPS
7	01/10/2012 03:52	-138,00	2012-09-28T02:25:00-CME-001 2012-09-30T22:12:00-IPS-001	CME IPS
8	09/10/2012 02:10	-116,00	2012-10-05T03:24:00-CME-001 2012-10-08T04:30:00-IPS-001	CME IPS
9	14/11/2012 07:27	-118,00	2012-11-09T15:24:00-CME-001 2012-11-12T22:15:00-IPS-001	CME IPS
10	17/03/2013 20:28	-132,00	2013-03-15T06:54:00-CME-001 2013-03-17T05:59:00-IPS-001	CME IPS
11	01/06/2013 07:48	-137,00	2013-05-31T15:45:00-HSS-001	HSS
12	29/06/2013 06:34	-111,00	Provavelmente CME do início do dia 24	CME
13	07/01/2015 11:00	-135,00	2015-01-07T05:24:00-IPS-001	IPS
14	17/03/2015 22:47	-234,00	2015-03-15T02:00:00-CME-001 2015-03-16T00:00:00-HSS-001 2015-03-17T04:05:00-IPS-001	CME HSS IPS
15	23/06/2015 04:24	-208,00	2015-06-21T02:48:00-CME-001 2015-06-22T17:59:00-IPS-001	CME IPS
16	20/12/2015 22:49	-170,00	2015-12-16T09:36:00-CME-001 2015-12-16T14:48:00-CME-001 2015-12-19T15:27:00-IPS-001	CME IPC
17	01/01/2016 01:07	-117,00	2015-12-28T12:39:00-CME-001	CME
18	06/03/2016 21:20	-110,00	2016-03-06T04:30:00-IPS-001 2016-03-06T09:00:00-HSS-001	IPS HSS
19	13/10/2016 23:45	-114,00	2016-10-08T21:09:00-CME-001 2016-10-12T21:21:00-IPS-001	CME IPS
20	28/05/2017 07:13	-142,00	2017-05-23T05:00:00-CME-001	CME
21	08/09/2017 01:08	-146,00	2017-09-06T12:24:00-CME-001 2017-09-07T22:30:00-IPS-001	CME IPS
22	26/08/2018 07:11	-206,00	2018-08-20T21:24:00-CME-001 2018-08-25T06:00:00-IPS-001	CME IPS

Fonte: Autor

Durante o estudo dos eventos relacionadas às tempestades são observados alguns fenômenos interessantes, como uma única tempestade estar relacionada com mais de uma ejeção de massa coronal, como é o caso das tempestades 1 e 16. Analisando os detalhes da tempestade 1, com auxílio do satélite SDO, já citado anteriormente, assim como estudando os relatórios disponíveis no DONKI em relação à tempestade, observa-se pelo filtro 193AIA da SDO o momento das duas erupções solares relacionadas às CMEs que originaram a perturbação magnética, como é visto na Figura 28.

A partir do relatório obtido através do DONKI (MORGAN, 2011) referente a segunda CME, captada pelos satélites STEREO-A COR2 / STEREO-B COR2 e SOHO

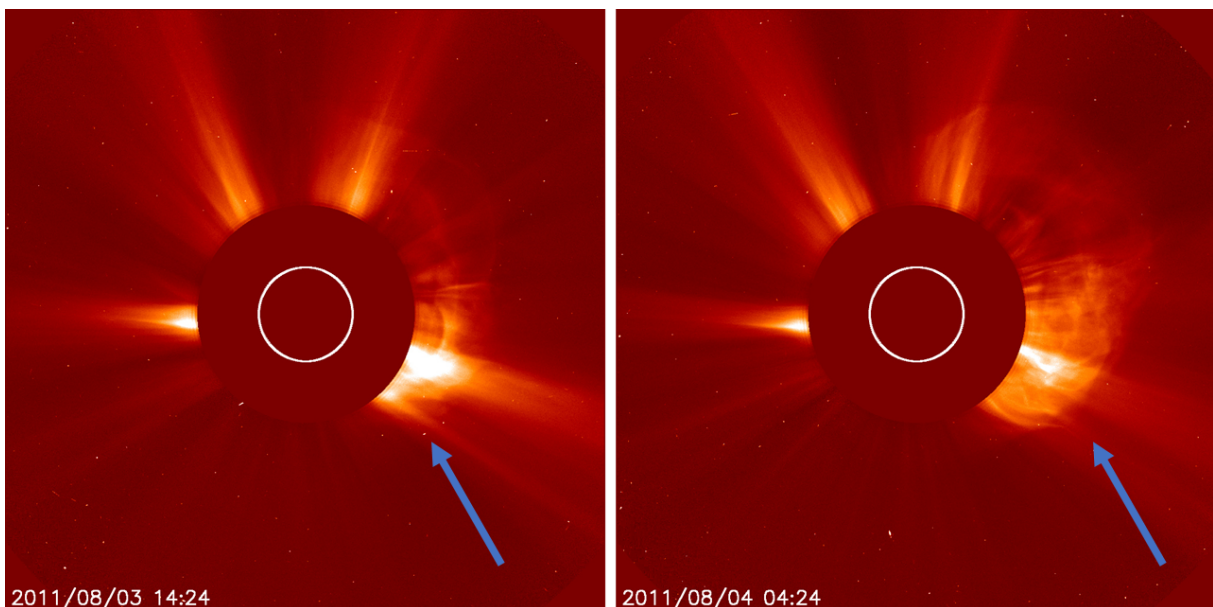
Figura 28 – SDO AIA193 - Corona - esq. 2011/08/03 13:56, dir. 2011/08/04 04:12



Fonte: NASA

LASCO C2/C3 (a Figura 29 mostra o momento da CME captada pelos satélites citados anteriormente), é visto que a interação entre as duas CMEs era esperada, aumentando a intensidade da tempestade ao atingir a Terra.

Figura 29 – SOHO C2 - esq. 2011/08/03 14:24, dir. 2011/08/04 04:24



Fonte: NASA

Em relação à tempestade 16 é observado um fenômeno diferente. Ainda que tenham ocorrido duas CMEs em um período curto de tempo estas não foram identificadas da mesma forma que na tempestade 1, apesar de serem relacionadas à mesma tempestade (16). Uma das possíveis explicações é a complexidade que uma junção de dois eventos, como CMEs, pode agregar para o estudo do vento solar. Uma CME com vento solar rápido

pode ser desacelerada ao interagir com outra CME, assim como uma CME anterior a outra pode remover parte do plasma do vento e reduzir a velocidade da CME seguinte (o que é válido neste caso em que, segundo o relatório do DONKI, a velocidade aproximada da segunda CME (≈ 580 km/s) foi menor que da primeira (≈ 650 km/s), o que é chamado de *preconditioning* (ZHAO et al., 2017).

Junto a isso, Cherniak e Zakharenkova (2018) menciona em seu estudo que este evento foi iniciado por uma erupção solar ocorrida em 16 de dezembro de 2015 e por consequência de duas CMEs, possivelmente as mesmas identificadas neste estudo, ainda segundo Cherniak e Zakharenkova (2018), isso teria causado um aumento nos parâmetros do vento solar e do campo magnético interplanetário. No mais, o estudo da interação entre CMEs, não sendo o objetivo central deste trabalho e de grande complexidade, deixa margem para pesquisa futura em relação ao fenômeno observado na tempestade 16.

Nos resultados também foi percebido que a grande maioria das tempestades tiveram como causa CMEs e não HSSs, de acordo com a literatura, HSSs não costumam originar tempestades intensas ($\leq -100nT$) (GERONTIDOU; MAVROMICHALAKI; DAGLIS, 2018), portanto o resultado era esperado. Segundo Gerontidou, Mavromichalaki e Daglis (2018) um tipo de perturbação favorável à tempestades magnéticas é causada por HSSs, uma vez que estes interagem com o vento solar mais lento, criando regiões chamadas de CIR (corotating interaction regions), porém as perturbações causadas por tal interação ainda costumam ser menos intensas que as causadas por CMEs. Ainda no mesmo estudo Gerontidou, Mavromichalaki e Daglis (2018) cita que a porcentagem de HSSs originárias de buracos coronais que causam tempestades é similar a de CMEs, porém essas tempestades não costumam causar perturbações com DST menor que $-50nT$, o que seria equivalente para o SYM-H, portanto isso explicaria a baixa ocorrência de tempestades originárias de HSSs neste estudo, já que um dos critérios de seleção foi a intensidade da tempestade ser $\leq -100nT$.

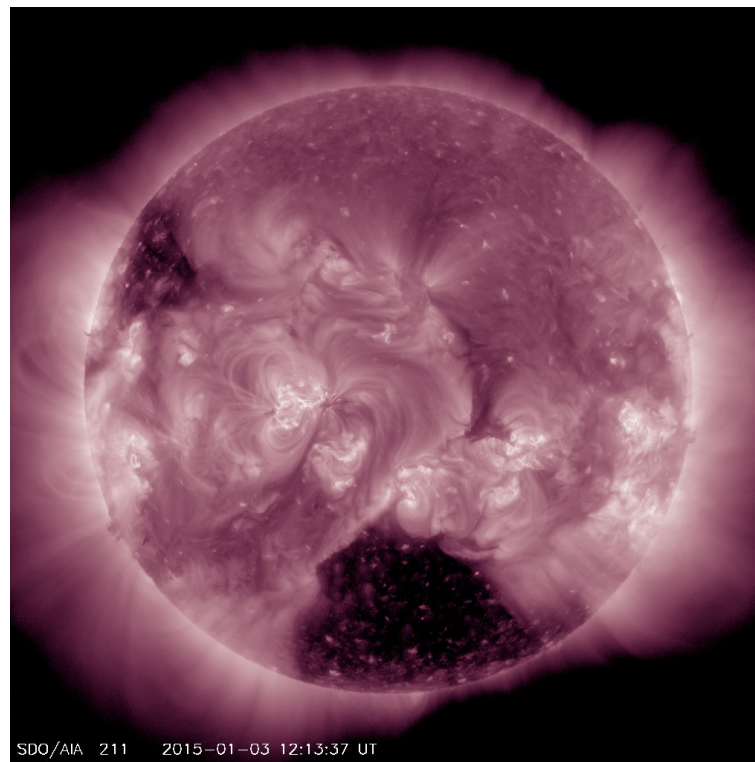
Dentre as 22 tempestades analisadas apenas 3 delas foram associadas à HSSs (tempestades 11, 14 e 18), sendo que uma delas (tempestade 14) também foi associada à uma CME. Ao fazer uma média simples das intensidades das perturbações ao índice SYM-H das tempestades originadas por HSSs (apenas a 11 e 18, excluindo a 18 por ter também ser relacionada à CME) tem-se uma média de $-123,5$ nT, realizando a mesma média com as tempestades originadas de CME (todas com exceção da 11, 18 e 14, a última sendo eliminada por também ser relacionada a um HSS) tem-se uma média de $-139,63$ nT, apesar de ser esperado que a intensidade de tempestades originadas de CMEs sejam mais intensas, é considerado falta de tempestades originadas por HSSs suficientes para uma comparação satisfatória das médias.

Em relação à anomalia da tempestade 12, durante o estudo não foi encontrado no DONKI nenhum outro evento relacionado à tempestade, porém, é sabido que para ter

havido uma tempestade é necessário que tenha ocorrido algum evento anterior. Sendo assim, foi consultado o relatório da tempestade supracitada, em que consta que a origem teria sido uma possível CME ocorrida no dia 23/06/2013. Embora não encontrado nenhum alerta de CME neste dia, possivelmente a tempestade foi causada por uma CME do início do dia 24/06/2013, mais especificamente às 03:54. Esta CME também está relacionada com um choque interplanetário no dia 27/06/2013

Em relação à tempestade do 07/01/2015 também não foi possível encontrar CMEs ou HSS relacionados a ela, apenas dois eventos foram ligados a esta tempestade (um choque interplanetário e um cruzamento da magnetopausa). Porém, um estudo de [Cid et al. \(2016\)](#), sugere que a tempestade de 07 janeiro de 2015 está relacionada com uma fraca CME ocorrida no dia 03, responsável pela nuvem magnética detectada no mesmo dia da tempestade. A Figura 30 mostra a coroa solar no dia 03/01/2015 através do filtro AIA211, onde é possível perceber a área escura próximo do polo sul solar. O que explicaria a intensidade pouco esperada para tal tempestade é uma complexa interação entre a nuvem magnética desta CME e um *fast stream* ([CID et al., 2016](#)).

Figura 30 – SDO AIA211 - Corona - 03/01/2015



Fonte: NASA

Conclusão

A ocorrência de tempestades magnéticas na Terra é um fenômeno recorrente, apenas no ciclo solar 24 foram registradas 25 tempestades magnéticas intensas, de acordo com o critério utilizada por [Gonzalez et al. \(1994\)](#) de intensidade de perturbação magnética no índice $DST/SYM-H \leq -100nT$. Apesar disso tempestades geomagnéticas intensas podem acarretar danos e perigos para equipamentos tecnológicos, satélites, comunicação moderna, entre outros, sendo assim o estudo para o melhor entendimento desses eventos, desde as estruturas solares responsáveis por tais, passando pelas propriedades do vento solar durante a ocorrência de uma tempestade, até a interação entre vento solar e a magnetosfera terrestre, incluindo os efeitos e consequências são de suma importância ([CID et al., 2014](#)).

Neste trabalho identificou-se a clara correlação entre a componente Bz do meio interplanetário e a ocorrência de tempestades magnéticas intensas, apresentando um valor médio de correlação cruzada entre as 22 tempestades estudadas maior que 0,7 (tanto com as curvas suavizadas quanto sem a suavização de altas frequências) quando aplicado atraso entre SYM-H e Bz, já para quando o atraso não é aplicado, o coeficiente de correlação foi de 0,43 sem a suavização das curvas, corroborando com os achados de [Gonzalez e Echer \(2005\)](#) em relação ao atraso aproximado de 2h existente entre os picos de Bz e SYM-H.

A correlação cruzada, que em geral apresentou um coeficiente de correlação mais forte entre Bz e SYM-H para todas as tempestades condizente com o estudo de [Pokharia et al. \(2018\)](#), que encontrou um coeficiente de 0,8 e [Bakare e Chukwuma \(2012\)](#) que encontrou um coeficiente de 0,9. Sendo assim, a relação entre a componente Bz do meio interplanetário e as perturbações geomagnéticas medidas pelo índice SYM-H foi estabelecida, como citado por [Gonzalez, Tsurutani e Gonzalez \(1999\)](#).

As demais propriedades do vento solar observadas como a velocidade, campo magnético interplanetário total e densidade de prótons, não apresentaram correlação significativa. A correlação de velocidade foi similar ao encontrado por [Mansilla \(2008\)](#), porém contrariando o artigo de [Bakare e Chukwuma \(2012\)](#) que encontrou um coeficiente de aproximadamente 0,6 e [Pokharia et al. \(2018\)](#) que encontrou 0,7. O coeficiente de correlação entre SYM-H e velocidade encontrado neste trabalho foi de 0,13.

A correlação para SYM-H e densidade foi de 0,09, ligeiramente abaixo do encontrado por [Mansilla \(2008\)](#), porém isso pode ser explicado pelo aumento da densidade ocorrer usualmente na fase inicial da tempestade magnética ou antes dela, como o período de estudo para geração das correlações entre densidade e SYM-H foi com foco na fase principal, isso pode ter interferido no resultado encontrado.

Para o campo magnético interplanetário total foi encontrado um valor de coeficiente

de correlação de 0,25, distante do citado por [Rathore et al. \(2011\)](#) (0,71), porém uma diferença fundamental entre o estudo citado e o presente trabalho é a quantidade e intensidade das tempestades analisadas. Enquanto [Rathore et al. \(2011\)](#) analisou 220 tempestades com picos mínimos entre -50nT e -300nT no índice DST, neste trabalho foram estudadas 22 tempestades com picos mínimos maiores que -100nT, podendo esta ser a causa da discrepância observada.

Em relação às estruturas solares observadas causadoras das tempestades magnéticas intensas foi concluído que a maior parte é advinda de ejeções de massa coronal (CMEs), sendo uma pequena parcela proveniente ou com contribuição de HSSs ($\approx 14\%$), o que corrobora com o mencionado por [Gerontidou, Mavromichalaki e Daglis \(2018\)](#) que tempestades originárias de HSSs costumam ser menos intensas.

Alguns eventos que se destacaram dos demais pela estrutura solar relacionada, foram analisados mais a fundo para melhor entendimento, porém, como não foi o objetivo deste trabalho o estudo aprofundado destas estruturas e suas respectivas interações no meio interplanetário, foi deixado espaço para estudos futuros em relação aos eventos.

Referências

- AKASOFU, S. A review on the current understanding in the study of geomagnetic storms. *International Journal of Earth Science and Geophysics*, v. 4, n. 018, p. 13, 2018. Citado na página 39.
- ALBERTI, T. et al. Timescale separation in the solar wind-magnetosphere coupling during st. patrick's day storms in 2013 and 2015. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, Wiley Online Library, v. 122, n. 4, p. 4266–4283, 2017. Citado na página 47.
- BAKARE, N.; CHUKWUMA, V. Relationship between dst and solar wind conditions during intense geomagnetic storms. *Indian Journal of Radio and Space Physics*, v. 39, 07 2012. Citado na página 69.
- Baumjohann, W.; Treumann, R. A. *Basic space plasma physics*. [S.l.: s.n.], 1996. Citado na página 32.
- BELL, P. M. *Magnetospheric cleft*. [S.l.]: Wiley Online Library, 1981. Citado na página 35.
- CHARBONNEAU, P. Dynamo models of the solar cycle. *Living Reviews in Solar Physics*, Springer, v. 7, n. 1, p. 1–91, 2010. Citado na página 27.
- CHERNIAK, I.; ZAKHARENKOVA, I. Large-scale traveling ionospheric disturbances origin and propagation: Case study of the december 2015 geomagnetic storm. *Space Weather*, Wiley Online Library, v. 16, n. 9, p. 1377–1395, 2018. Citado na página 66.
- CHORAGHE, K. et al. Properties of the recovery phase of extreme storms. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, Wiley Online Library, v. 126, n. 9, p. e2020JA028685, 2021. Citado na página 46.
- CID, C. et al. On extreme geomagnetic storms. *Journal of Space Weather and Space Climate*, EDP Sciences, v. 4, p. A28, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 69.
- CID, C. et al. The stealth geomagnetic storm on 2015 january 7: forecasting, solar sources and interplanetary medium interactions. *Highlights on Spanish Astrophysics IX, Proceedings of the XII Scientific Meeting of the Spanish Astronomical Society*, 2016. Citado na página 67.
- COMMUNITY, T. N. *numpy.corrcoef*. 2021. Numpy website. Disponível em: <<https://numpy.org/doc/stable/reference/generated/numpy.corrcoef.html>>. Acesso em: 19 out 2021. Citado na página 47.
- DAGLIS, I. A. et al. The terrestrial ring current: Origin, formation, and decay. *Reviews of Geophysics*, Wiley Online Library, v. 37, n. 4, p. 407–438, 1999. Citado 3 vezes nas páginas 35, 36 e 37.
- EDMONDSON, J. K. *Theory of three-dimensional interchange reconnection and the dynamic evolution of the global solar coronal magnetic field structure: A mechanism for the origin and generation of the slow solar wind*. Tese (Doutorado) — University of Michigan, 2009. Citado na página 30.

- ERICKSON, K. *What Is the Solar Cycle?* 2021. Space Place NASA. Disponível em: <<https://spaceplace.nasa.gov/solar-cycles/en/>>. Acesso em: 14 ago 2021. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.
- FELDMAN, U.; LANDI, E.; SCHWADRON, N. On the sources of fast and slow solar wind. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, Wiley Online Library, v. 110, n. A7, 2005. Citado na página 33.
- FERREIRA, P. P. et al. Conceitos básicos sobre a física da formação de tubos de fluxo magnético nas proximidades da terra. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, SciELO Brasil, v. 39, 2017. Citado na página 38.
- GERONTIDOU, M.; MAVROMICHALAKI, H.; DAGLIS, T. High-speed solar wind streams and geomagnetic storms during solar cycle 24. *Solar Physics*, Springer, v. 293, n. 9, p. 1–18, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 66 e 70.
- GONZALEZ, W.; ECHER, E. A study on the peak dst and peak negative bz relationship during intense geomagnetic storms. *Geophysical research letters*, Wiley Online Library, v. 32, n. 18, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 61 e 69.
- GONZALEZ, W. et al. What is a geomagnetic storm? *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, Wiley Online Library, v. 99, n. A4, p. 5771–5792, 1994. Citado 4 vezes nas páginas 35, 41, 53 e 69.
- GONZALEZ, W. D.; TSURUTANI, B. T.; GONZALEZ, A. L. C. D. Interplanetary origin of geomagnetic storms. *Space Science Reviews*, Springer, v. 88, n. 3, p. 529–562, 1999. Citado 3 vezes nas páginas 25, 33 e 69.
- GRANDIN, M.; AIKIO, A. T.; KOZLOVSKY, A. Properties and geoeffectiveness of solar wind high-speed streams and stream interaction regions during solar cycles 23 and 24. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, Wiley Online Library, v. 124, n. 6, p. 3871–3892, 2019. Citado na página 33.
- GROCOTT, A.; MILAN, S. E. The influence of imf clock angle timescales on the morphology of ionospheric convection. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, Wiley Online Library, v. 119, n. 7, p. 5861–5876, 2014. Citado na página 41.
- HATHAWAY, D. H. The solar cycle. *Living reviews in solar physics*, Springer, v. 12, n. 1, p. 4, 2015. Citado 3 vezes nas páginas 25, 27 e 28.
- IYEMORI, T. et al. Mid-latitude geomagnetic indices “asy” and “sym” for 2009 (provisional). *Data Analysis Center for Geomagnetism and Space Magnetism, Graduate School of Science, Kyoto University, Japan*, 2010. Citado 3 vezes nas páginas 37, 38 e 43.
- KASRAN, F. M. et al. Geomagnetically induced currents (gics) in equatorial region. In: . [S.l.: s.n.], 2018. p. 112–117. Citado na página 39.
- KING, J.; PAPITASHVILI, G. N.; SYSTEMS, I. A. *One min and 5-min solar wind data sets at the Earth’s bow shock nose*. 2021. SPDF website. Disponível em: <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/html/omni_min_data.html>. Acesso em: 18 out 2021. Citado na página 45.

- KOZYRA, J. U.; LIEMOHN, M. W. Ring current energy input and decay. *Magnetospheric Imaging—the Image Prime Mission*, Springer, p. 105–131, 2003. Citado 5 vezes nas páginas 25, 35, 36, 39 e 46.
- MANSILLA, G. A. Solar wind and imf parameters associated with geomagnetic storms with $dst < -50$ nt. *Physica Scripta*, IOP Publishing, v. 78, n. 4, p. 045902, 2008. Citado 3 vezes nas páginas 57, 58 e 69.
- MAYS, M. L. *DONKI - Database of Notifications, Knowledge, and Information*. 2016. CCMC website. Disponível em: <https://ccmc.gsfc.nasa.gov/RoR_WWW/SWREDI/2016/Mays_DONKI_201605.pdf>. Acesso em: 19 out 2021. Citado na página 44.
- MCPHERRON, R. L. *Geomagnetic Field*. 2021. Encyclopedia Britannica. Disponível em: <<https://www.britannica.com/science/geomagnetic-field>>. Acesso em: 18 nov 2021. Citado na página 38.
- MOORE, T. E. Ring current. In: _____. *Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2007. p. 863–865. ISBN 978-1-4020-4423-6. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4423-6_279>. Citado na página 35.
- MORGAN, R. *Space Weather Alert*. 2011. Citado na página 64.
- NASA. *SDO Data*. 2021. SDO NASA Website. Disponível em: <<https://sdo.gsfc.nasa.gov/data/>>. Acesso em: 17 ago 2021. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 32.
- NISHIDA, A. Magnetic reconnection in the tail of the magnetosphere. *Advances in Space Research*, v. 10, n. 9, p. 135–144, 1990. ISSN 0273-1177. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/027311779090219P>>. Citado na página 39.
- NOAA. *CORONAL HOLES*. 2021. SWPC website. Disponível em: <<https://www.swpc.noaa.gov/phenomena/coronal-holes>>. Acesso em: 17 ago 2021. Citado na página 31.
- NOAA. *SOLAR CYCLE PROGRESSION*. 2021. SWPC website. Disponível em: <<https://www.swpc.noaa.gov/products/solar-cycle-progression>>. Acesso em: 17 ago 2021. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 52.
- NOAA. *Solar Wind*. 2021. SWPC website. Disponível em: <<https://www.swpc.noaa.gov/phenomena/solar-wind>>. Acesso em: 15 nov 2021. Citado na página 32.
- NWS. *The Sun and Sunspots*. 2020. Weather website. Disponível em: <<https://www.weather.gov/fsd/sunspots>>. Acesso em: 16 ago 2021. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 30.
- ONOVUGHE, E. Usage of rc index as a good representation for characterising rapid variation signals in geomagnetic field studies. *Sun and Geosphere*, v. 13, p. 77–87, 2018. Citado na página 37.
- PALCA, J. *Coronal Holes: The (Rarely Round) Gaps In The Sun's Atmosphere*. 2013. NPR website. Disponível em: <<https://www.npr.org/2013/09/05/214574919/coronal-holes-the-rarely-round-gaps-in-the-suns-atmosphere>>. Acesso em: 16 ago 2021. Citado na página 30.

PAPITASHVILI, D. N. *One min and 5-min solar wind data sets at the Earth's bow shock nose*. 2009. OMNIWeb website. Disponível em: <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/html/sc_merge_data1.html>. Acesso em: 25 out 2021. Citado na página 45.

PESNELL, W. D. Lessons learned from predictions of solar cycle 24. *Journal of Space Weather and Space Climate*, EDP Sciences, v. 10, p. 60, 2020. Citado na página 28.

POKHARIA, M. et al. Study of geomagnetic storms and solar and interplanetary parameters for solar cycles 22 and 24. *Solar Physics*, Springer, v. 293, n. 9, p. 1–20, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 60 e 69.

RATHORE, B. S. et al. A correlative study of geomagnetic storms associated with solar wind and imf features during solar cycle 23. *International Journal of applied physics and mathematics*, IACSIT Press, v. 1, n. 2, p. 149, 2011. Citado 5 vezes nas páginas 47, 55, 57, 58 e 70.

RICHARDSON, J. D.; WANG, C.; PAULARENA, K. I. The solar wind: from solar minimum to solar maximum. *Advances in Space Research*, Elsevier, v. 27, n. 3, p. 471–479, 2001. Citado 3 vezes nas páginas 25, 27 e 28.

SCHWENN, R. Solar wind sources and their variations over the solar cycle. *Solar dynamics and its effects on the heliosphere and Earth*, Springer, p. 51–76, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 33.

SCKOPKE, N. A general relation between the energy of trapped particles and the disturbance field near the earth. *Journal of Geophysical Research*, Wiley Online Library, v. 71, n. 13, p. 3125–3130, 1966. Citado na página 36.

SOLANKI, S. K. Sunspots: an overview. *The Astronomy and Astrophysics Review*, Springer, v. 11, n. 2, p. 153–286, 2003. Citado na página 29.

SOUZA, V. et al. Bases teóricas da reconexão magnética. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, SciELO Brasil, v. 38, 2016. Citado na página 38.

SUBEDI, A.; ADHIKARI, B.; MISHRA, R. K. Variation of solar wind parameters during intense geomagnetic storms. *Himalayan physics*, p. 80–85, 2017. Citado na página 58.

TANSKANEN, E. I. et al. Terrestrial substorms as a part of global energy flow. *Helsingin yliopisto*, 2002. Citado na página 34.

TEAM, T. M. development. *matplotlib.pyplot.xcorr*. 2021. Matplotlib website. Disponível em: <https://matplotlib.org/stable/api/_as_gen/matplotlib.pyplot.xcorr.html>. Acesso em: 19 out 2021. Citado na página 48.

TOBIAS, S. The solar dynamo. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, The Royal Society, v. 360, n. 1801, p. 2741–2756, 2002. Citado na página 27.

WANLISS, J. A.; SHOWALTER, K. M. High-resolution global storm index: Dst versus sym-h. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, Wiley Online Library, v. 111, n. A2, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 38.

YOUNG, M. *The weakest solar cycle in 100 years*. 2013. Skyandtelescope. Disponível em: <<https://skyandtelescope.org/astronomy-news/the-weakest-solar-cycle-in-100-years/>>. Acesso em: 14 ago 2021. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.

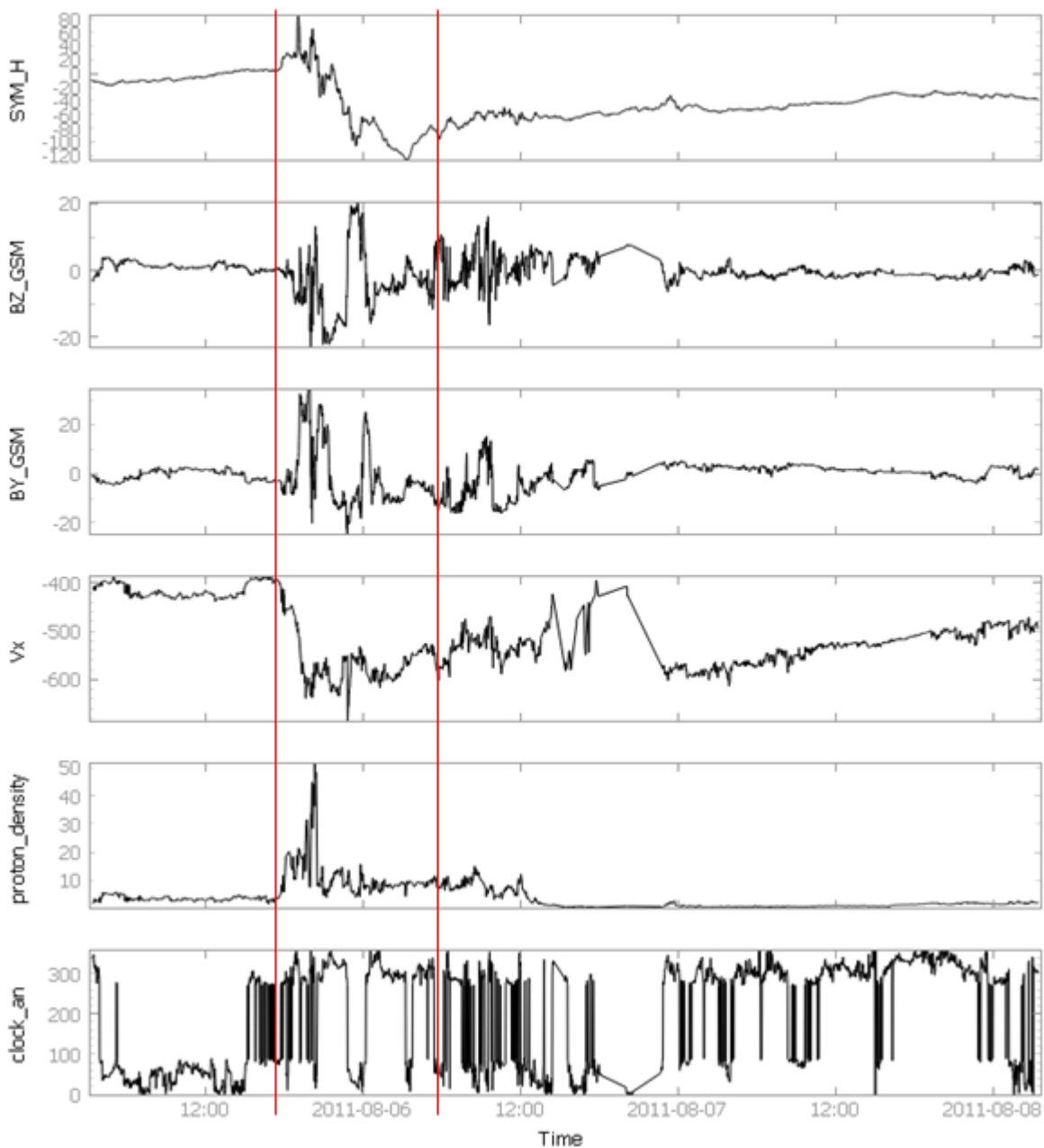
ZELL, H. *The Sun*. 2013. NASA website. Disponível em: <https://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/science/Sunlayers.html>. Acesso em: 16 ago 2021. Citado na página 31.

ZHAO, X. et al. Propagation characteristics of two coronal mass ejections from the sun far into interplanetary space. *The Astrophysical Journal*, IOP Publishing, v. 837, n. 1, p. 4, 2017. Citado na página 66.

Apêndices

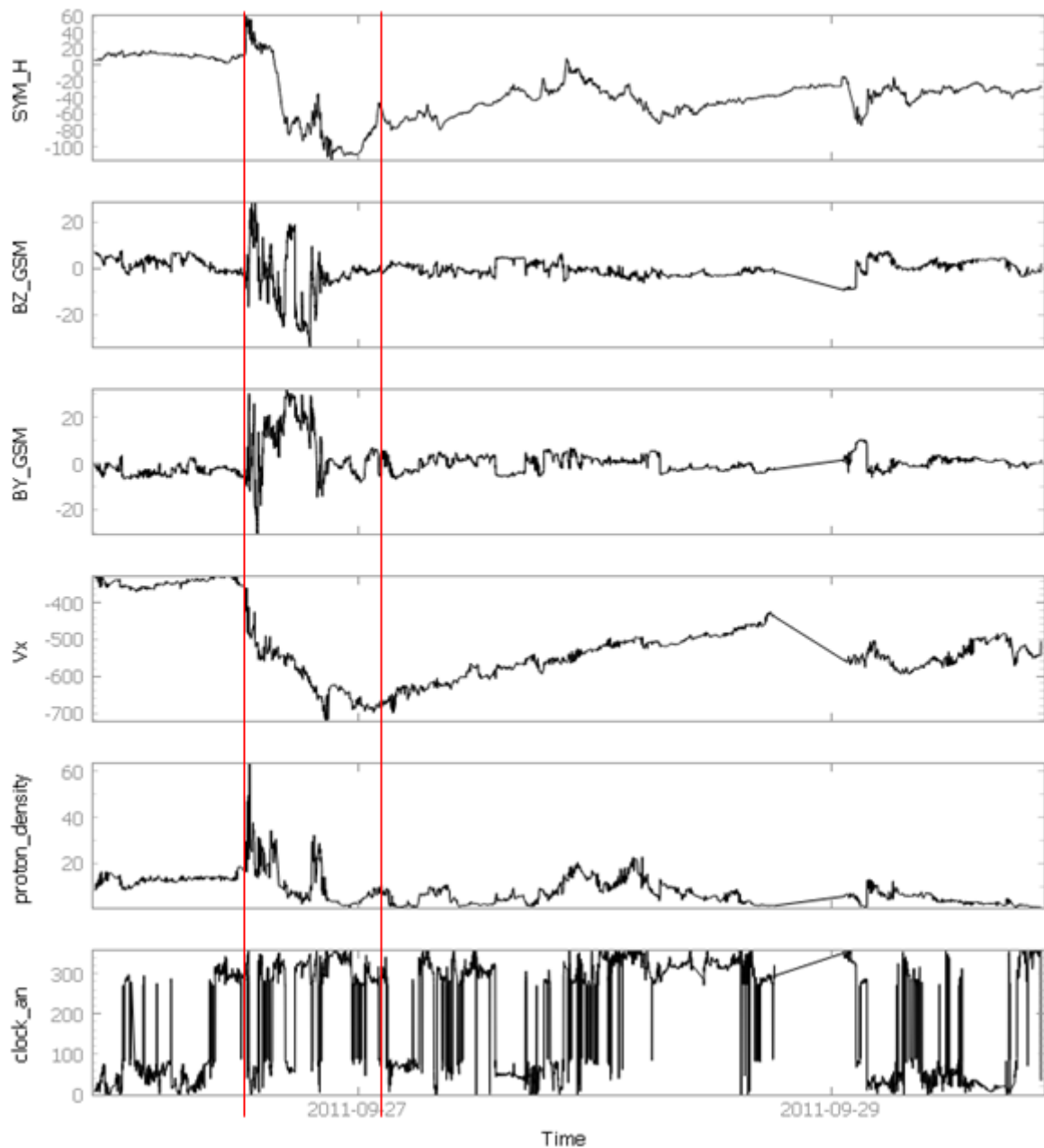
APÊNDICE A – Gráficos das propriedades,
SYM-H e clock angle para todas as
tempestades analisadas no trabalho

Figura 31 – Gráfico de todos os parâmetros estudados no período longo mencionado no trabalho, respectivamente de cima para baixo: SYM-H, Bz, By, Vx, densidade de prótons e clock angle. As linhas vermelhas representam o período curto mencionado durante o trabalho - Tempestade 1 com pico mínimo de SYM-H em 06/08/2011



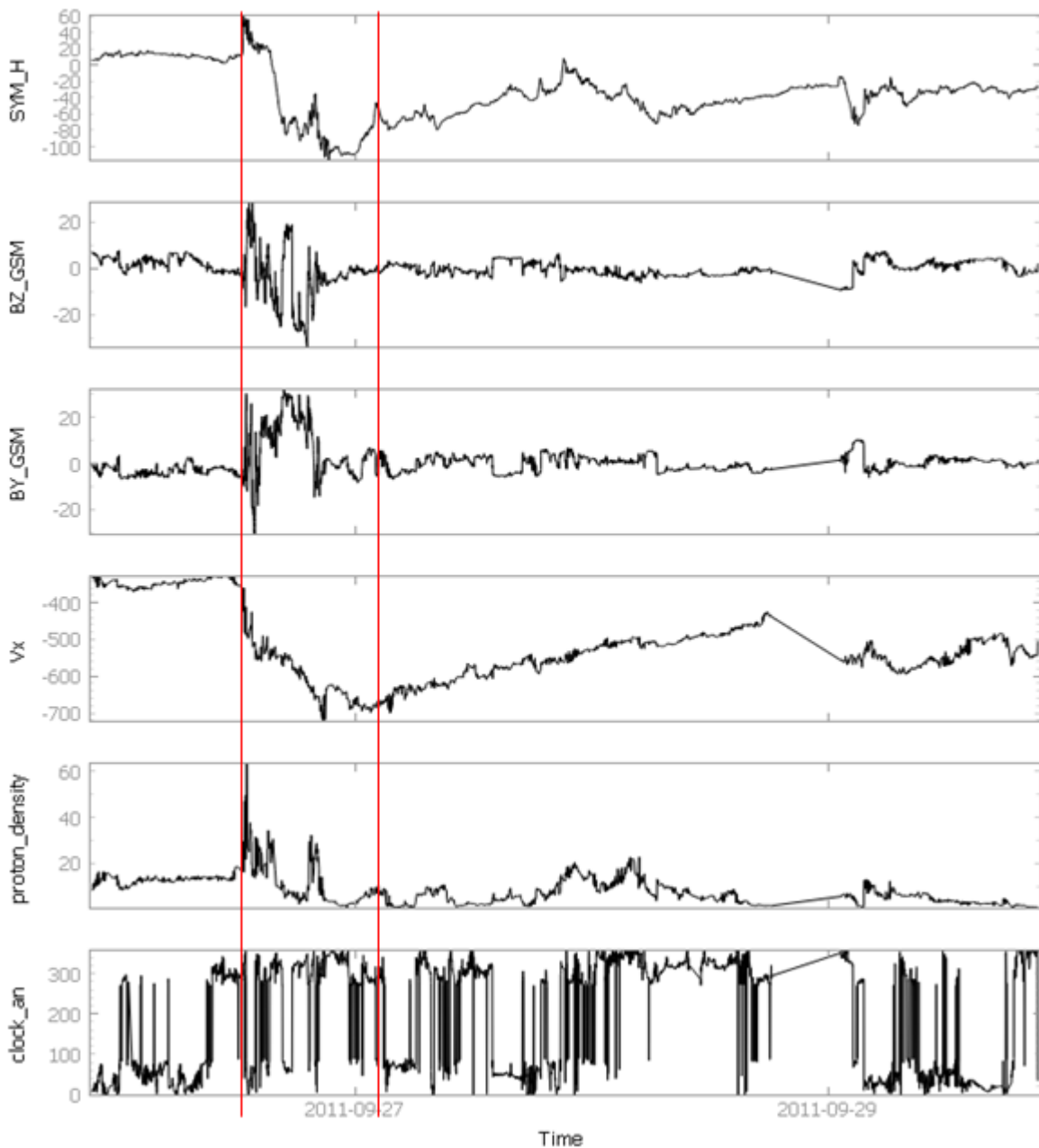
Fonte: Autor

Figura 32 – Gráfico de todos os parâmetros estudados no período longo mencionado no trabalho, respectivamente de cima para baixo: SYM-H, Bz, By, Vx, densidade de prótons e clock angle. As linhas vermelhas representam o período curto mencionado durante o trabalho - Tempestade 2 com pico mínimo de SYM-H em 26/09/2011



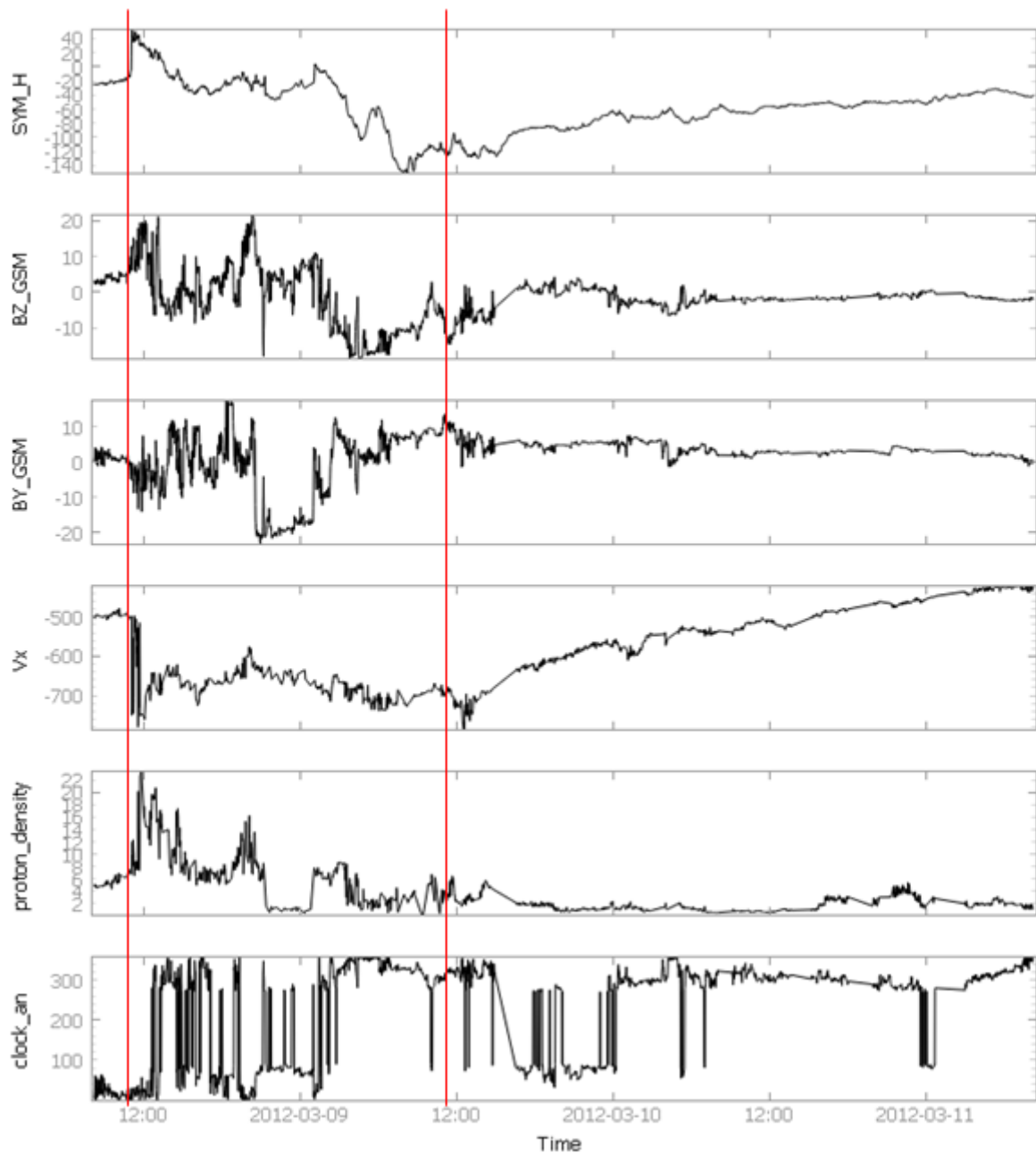
Fonte: Autor

Figura 33 – Gráfico de todos os parâmetros estudados no período longo mencionado no trabalho, respectivamente de cima para baixo: SYM-H, Bz, By, Vx, densidade de prótons e clock angle. As linhas vermelhas representam o período curto mencionado durante o trabalho - Tempestade 3 com pico mínimo de SYM-H em 25/10/2011



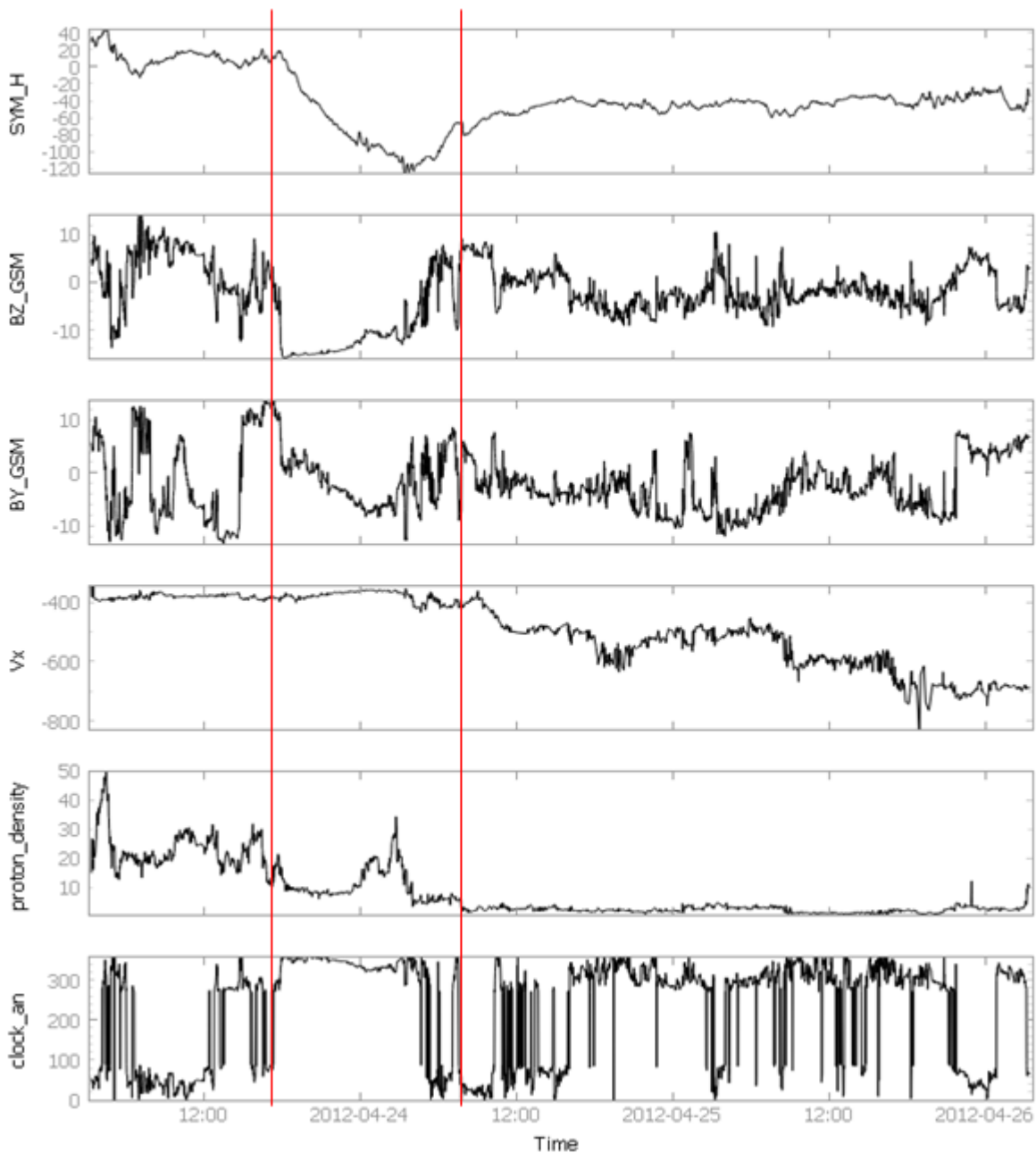
Fonte: Autor

Figura 34 – Gráfico de todos os parâmetros estudados no período longo mencionado no trabalho, respectivamente de cima para baixo: SYM-H, Bz, By, Vx, densidade de prótons e clock angle. As linhas vermelhas representam o período curto mencionado durante o trabalho - Tempestade 4 com pico mínimo de SYM-H em 09/03/2012



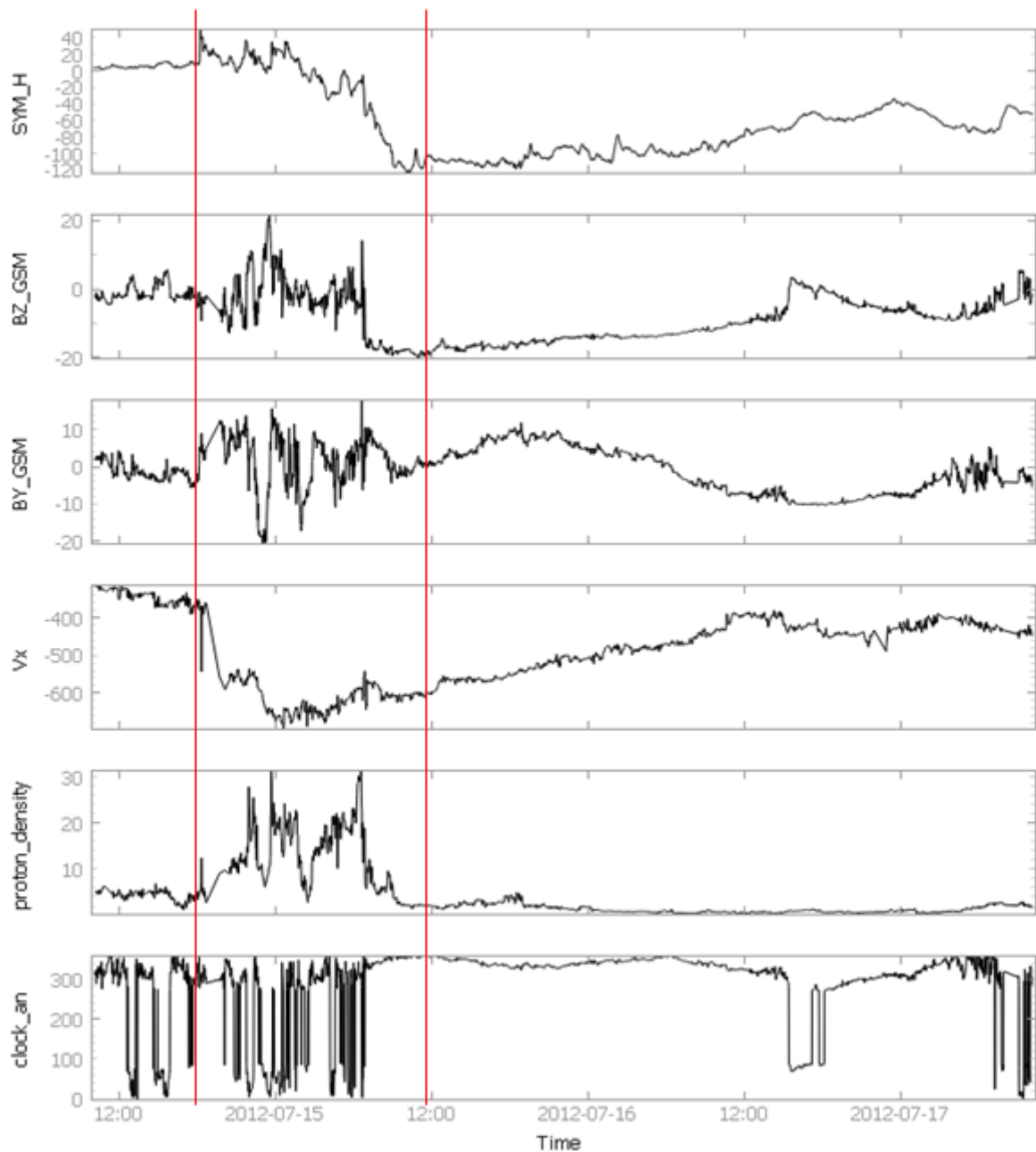
Fonte: Autor

Figura 35 – Gráfico de todos os parâmetros estudados no período longo mencionado no trabalho, respectivamente de cima para baixo: SYM-H, Bz, By, Vx, densidade de prótons e clock angle. As linhas vermelhas representam o período curto mencionado durante o trabalho - Tempestade 5 com pico mínimo de SYM-H em 24/04/2012



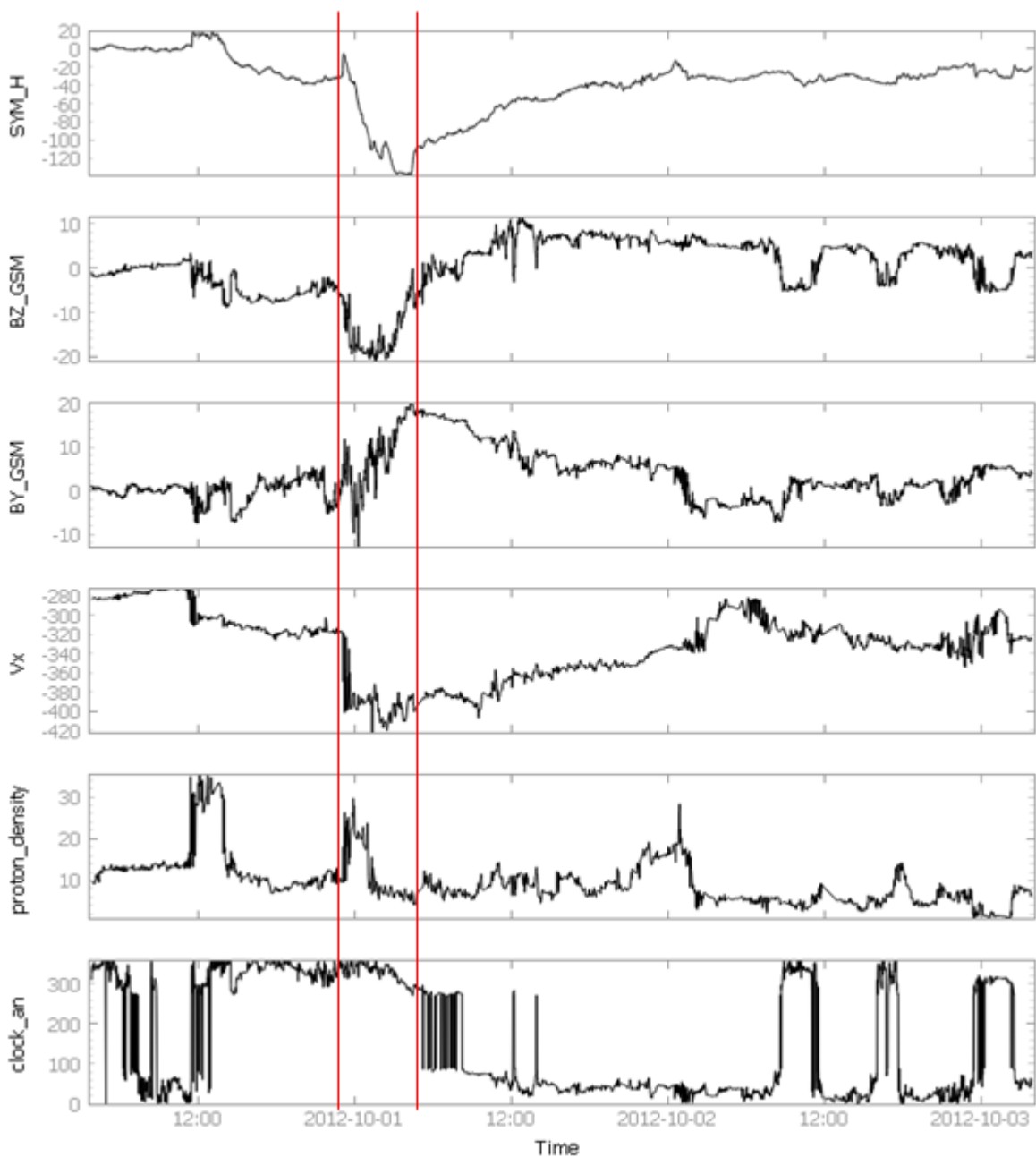
Fonte: Autor

Figura 36 – Gráfico de todos os parâmetros estudados no período longo mencionado no trabalho, respectivamente de cima para baixo: SYM-H, Bz, By, Vx, densidade de prótons e clock angle. As linhas vermelhas representam o período curto mencionado durante o trabalho - Tempestade 6 com pico mínimo de SYM-H em 15/07/2012



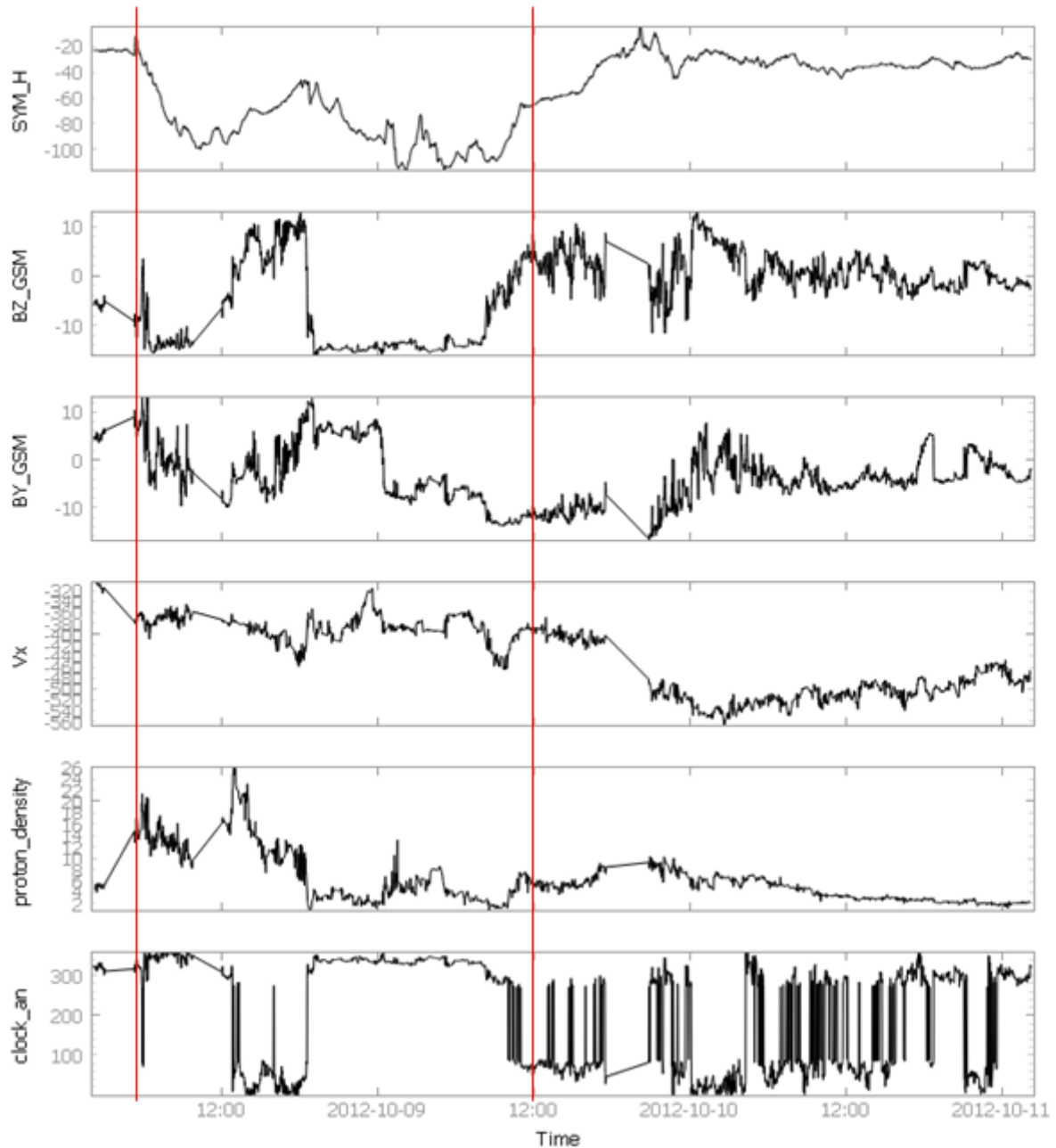
Fonte: Autor

Figura 37 – Gráfico de todos os parâmetros estudados no período longo mencionado no trabalho, respectivamente de cima para baixo: SYM-H, Bz, By, Vx, densidade de prótons e clock angle. As linhas vermelhas representam o período curto mencionado durante o trabalho - Tempestade 7 com pico mínimo de SYM-H em 01/10/2012



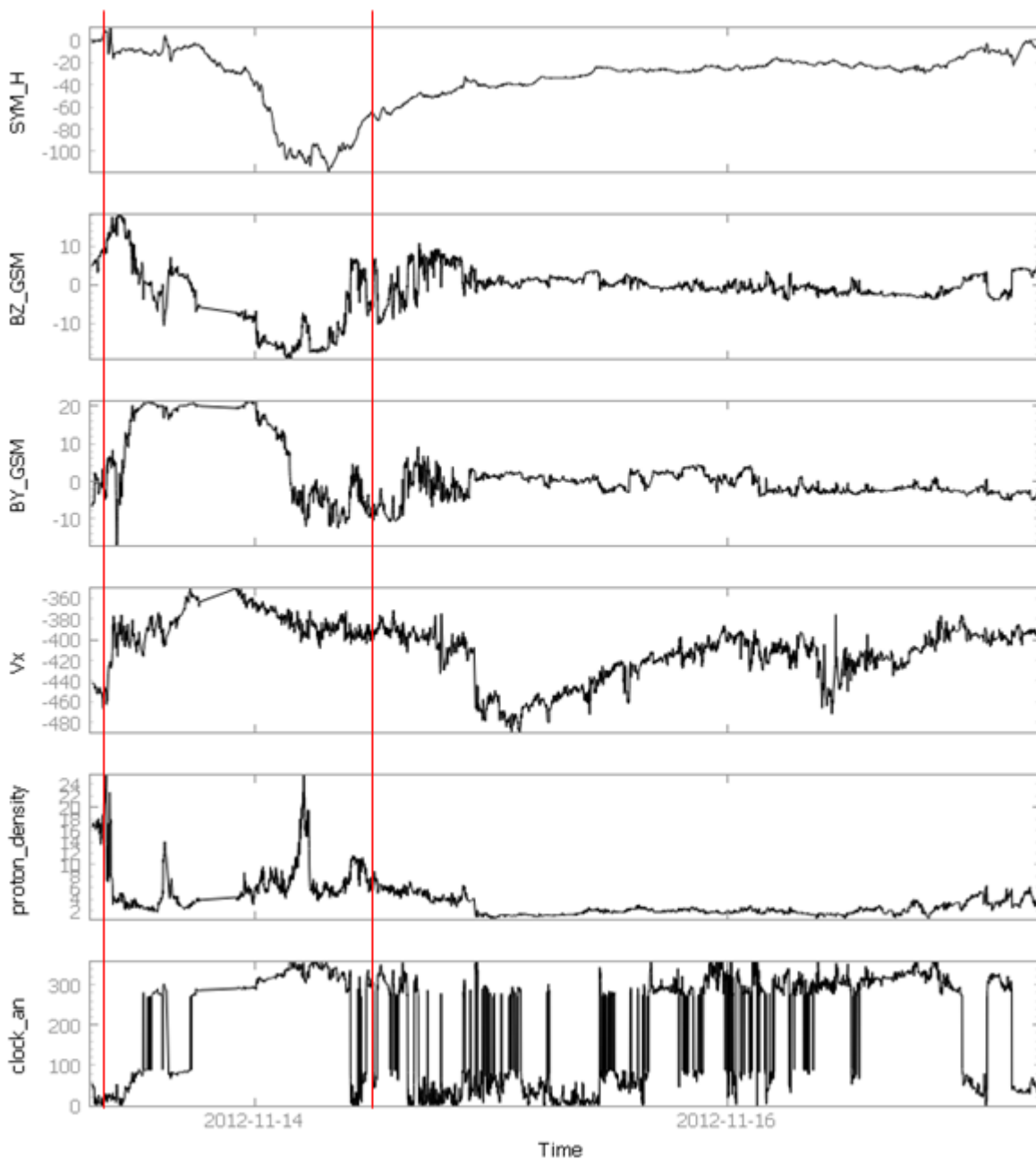
Fonte: Autor

Figura 38 – Gráfico de todos os parâmetros estudados no período longo mencionado no trabalho, respectivamente de cima para baixo: SYM-H, Bz, By, Vx, densidade de prótons e clock angle. As linhas vermelhas representam o período curto mencionado durante o trabalho - Tempestade 8 com pico mínimo de SYM-H em 09/10/2012



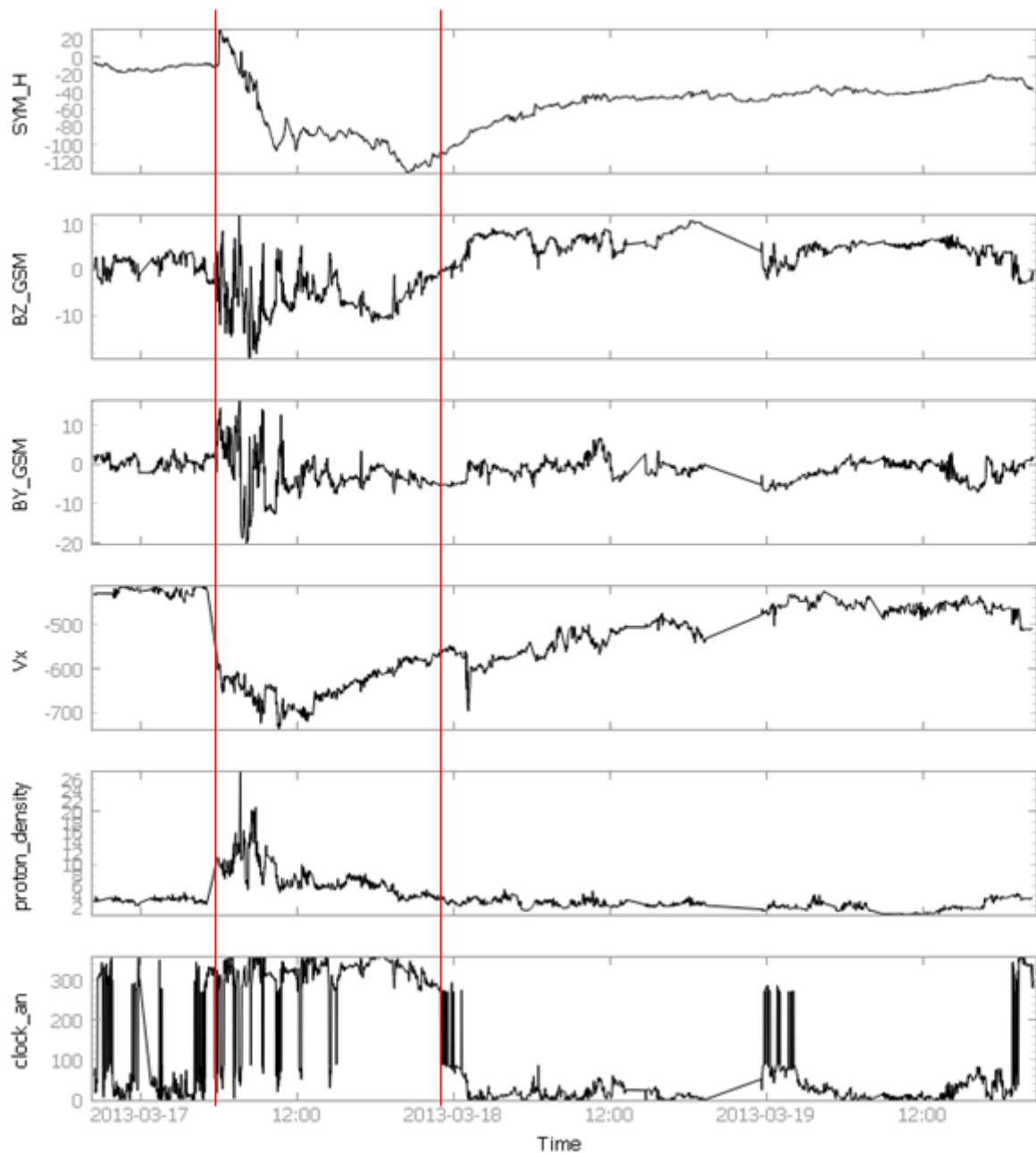
Fonte: Autor

Figura 39 – Gráfico de todos os parâmetros estudados no período longo mencionado no trabalho, respectivamente de cima para baixo: SYM-H, Bz, By, Vx, densidade de prótons e clock angle. As linhas vermelhas representam o período curto mencionado durante o trabalho - Tempestade 9 com pico mínimo de SYM-H em 14/11/2012



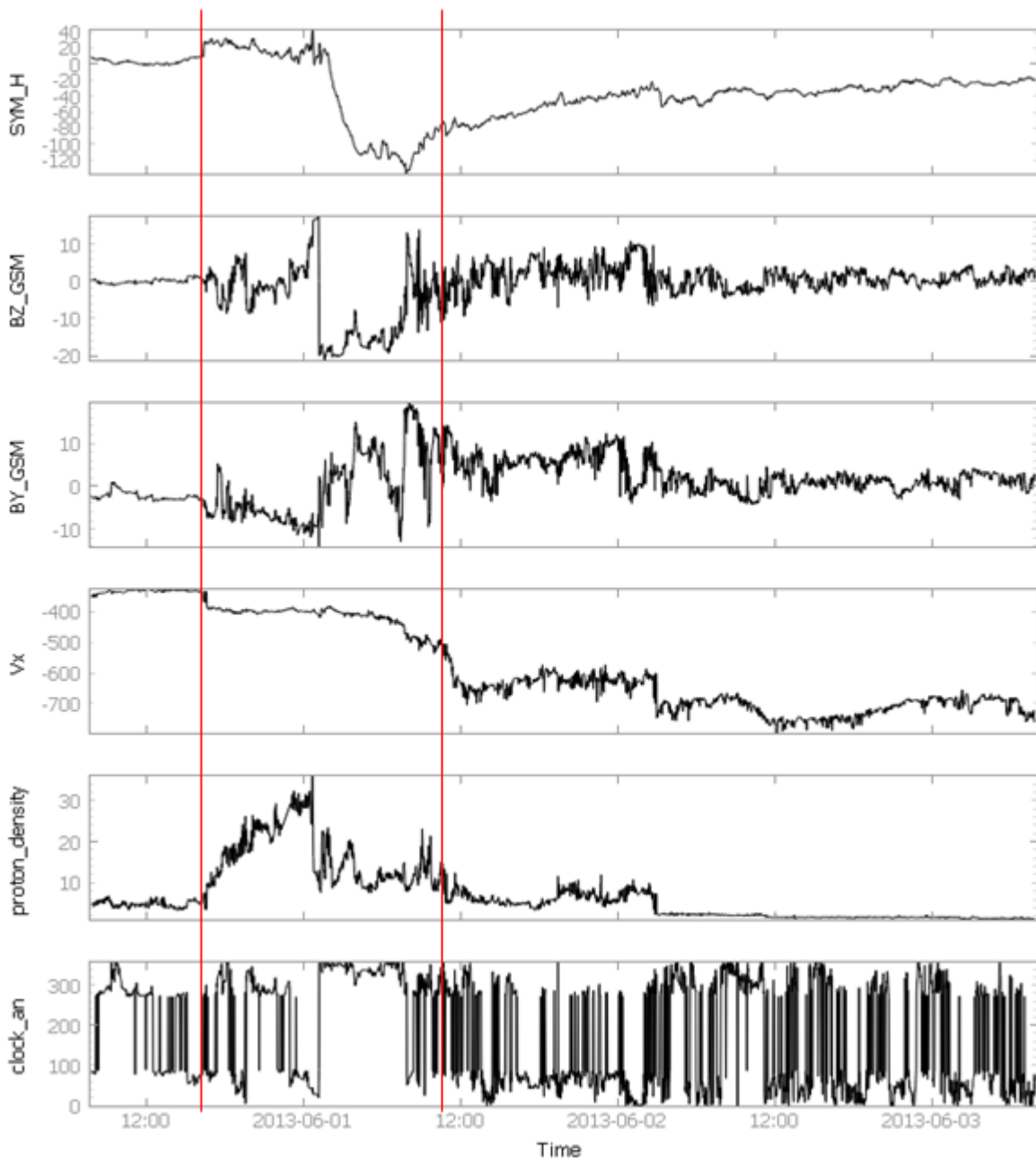
Fonte: Autor

Figura 40 – Gráfico de todos os parâmetros estudados no período longo mencionado no trabalho, respectivamente de cima para baixo: SYM-H, Bz, By, Vx, densidade de prótons e clock angle. As linhas vermelhas representam o período curto mencionado durante o trabalho - Tempestade 10 com pico mínimo de SYM-H em 17/03/2013



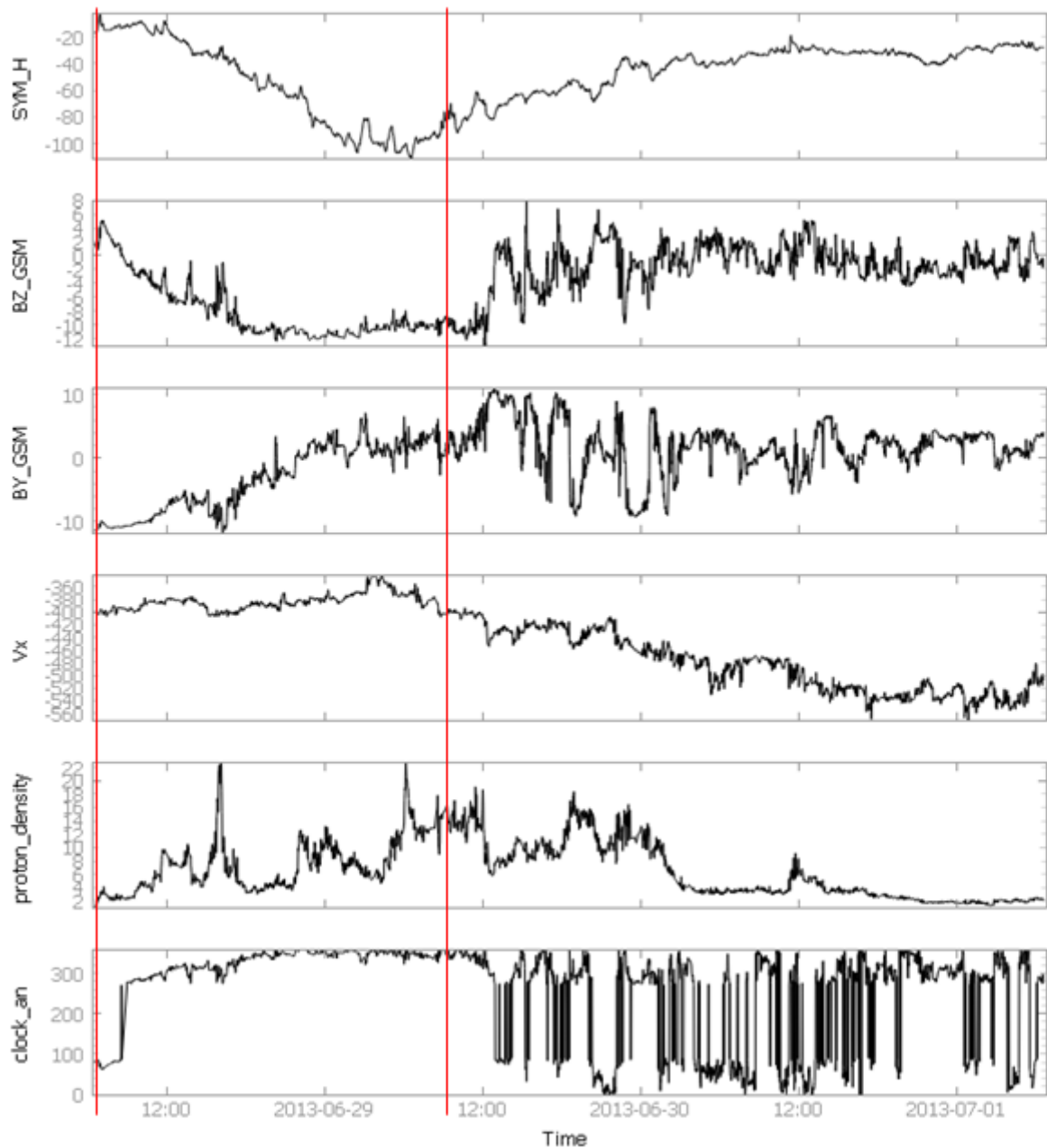
Fonte: Autor

Figura 41 – Gráfico de todos os parâmetros estudados no período longo mencionado no trabalho, respectivamente de cima para baixo: SYM-H, Bz, By, Vx, densidade de prótons e clock angle. As linhas vermelhas representam o período curto mencionado durante o trabalho - Tempestade 11 com pico mínimo de SYM-H em 01/06/2013



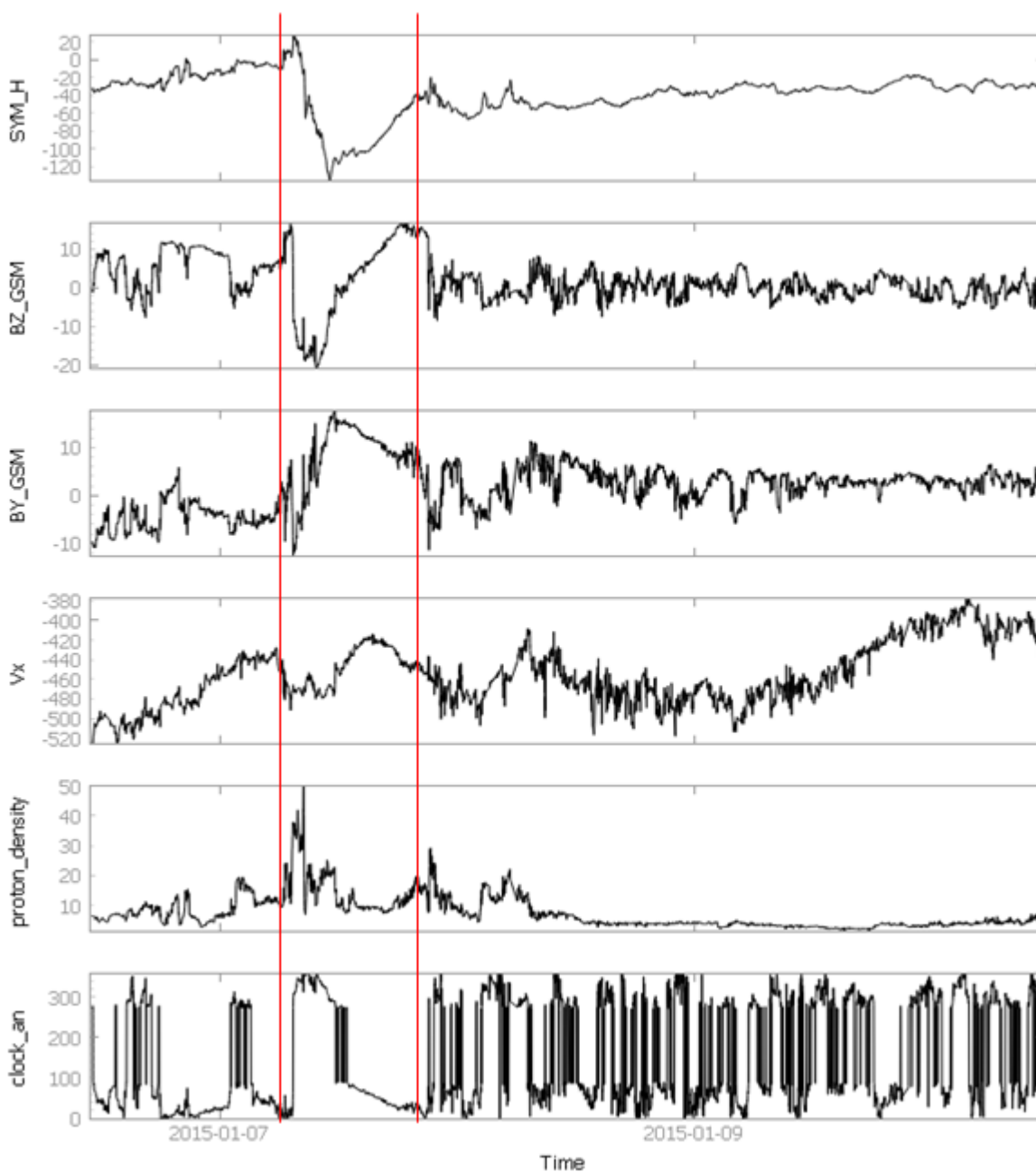
Fonte: Autor

Figura 42 – Gráfico de todos os parâmetros estudados no período longo mencionado no trabalho, respectivamente de cima para baixo: SYM-H, Bz, By, Vx, densidade de prótons e clock angle. As linhas vermelhas representam o período curto mencionado durante o trabalho - Tempestade 12 com pico mínimo de SYM-H em 29/06/2013



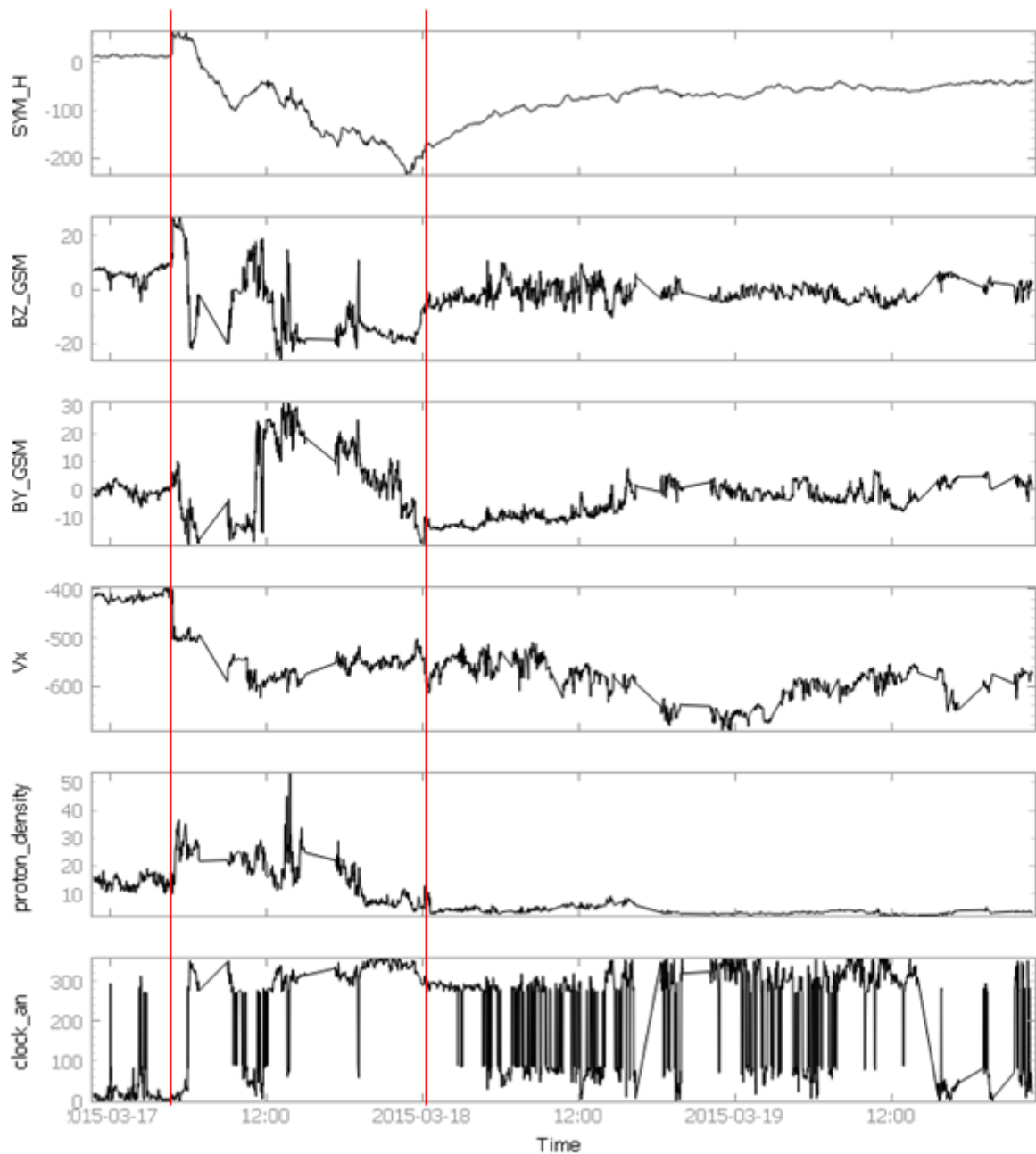
Fonte: Autor

Figura 43 – Gráfico de todos os parâmetros estudados no período longo mencionado no trabalho, respectivamente de cima para baixo: SYM-H, Bz, By, Vx, densidade de prótons e clock angle. As linhas vermelhas representam o período curto mencionado durante o trabalho - Tempestade 13 com pico mínimo de SYM-H em 07/01/2015



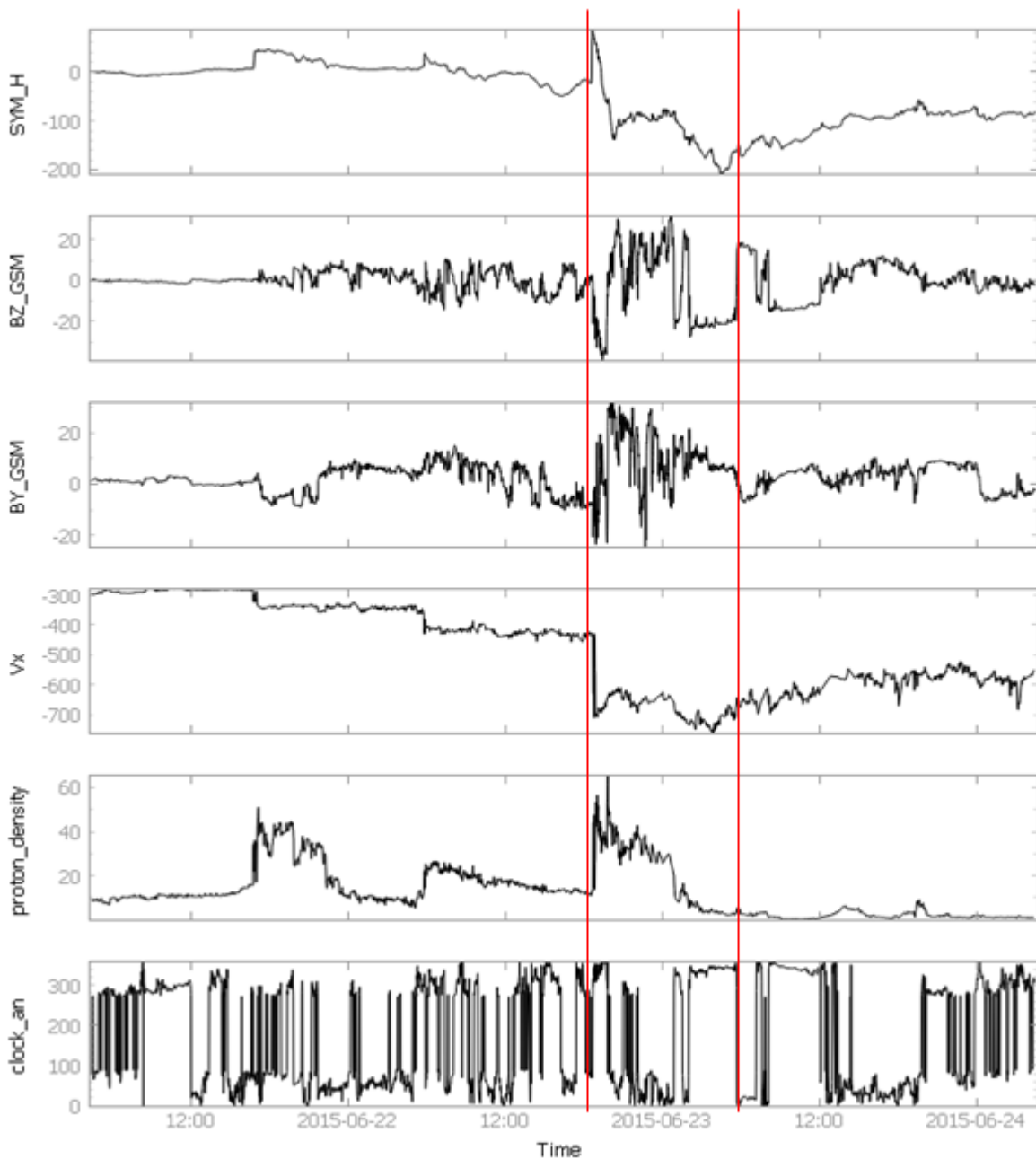
Fonte: Autor

Figura 44 – Gráfico de todos os parâmetros estudados no período longo mencionado no trabalho, respectivamente de cima para baixo: SYM-H, Bz, By, Vx, densidade de prótons e clock angle. As linhas vermelhas representam o período curto mencionado durante o trabalho - Tempestade 14 com pico mínimo de SYM-H em 17/03/2015



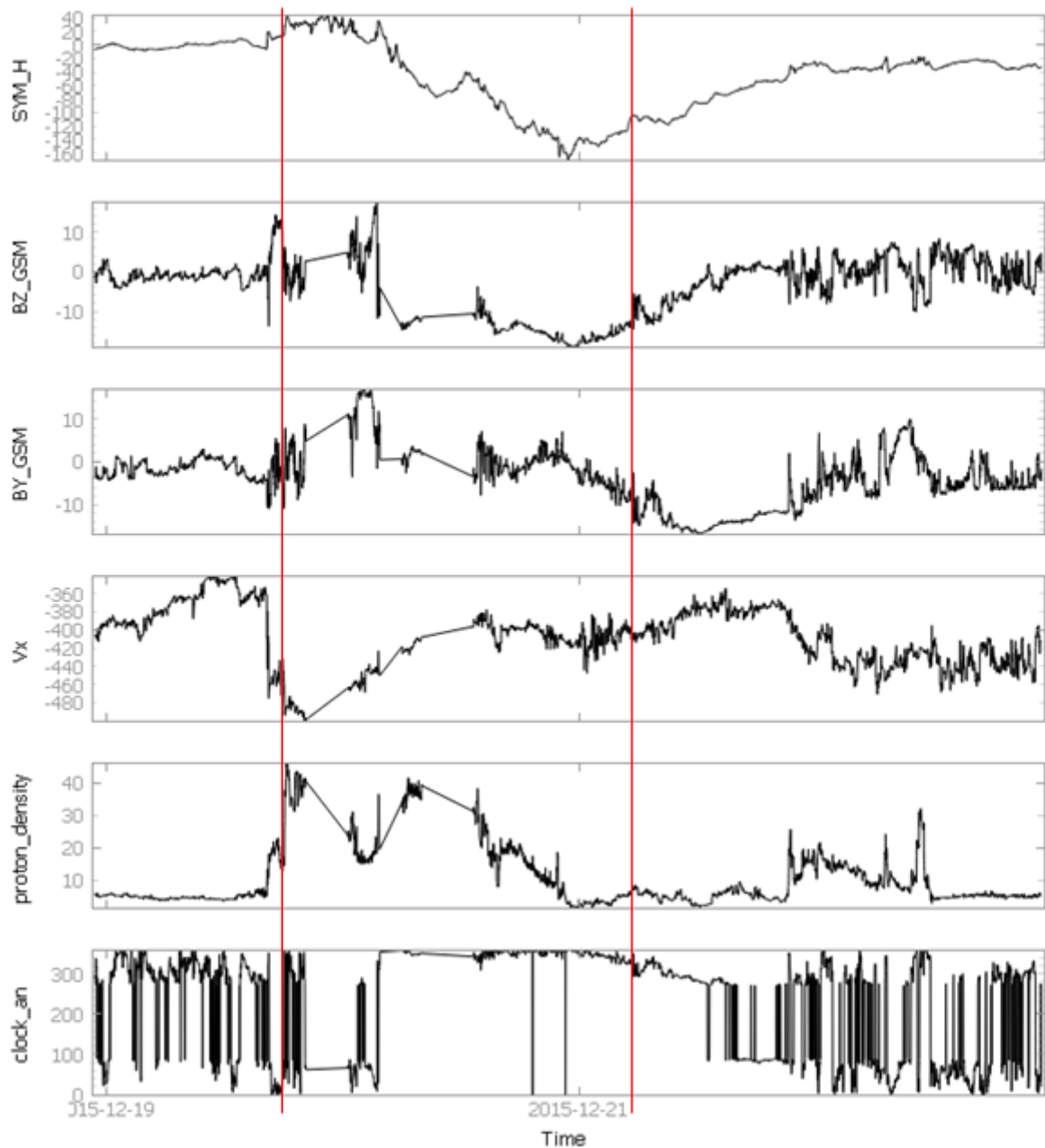
Fonte: Autor

Figura 45 – Gráfico de todos os parâmetros estudados no período longo mencionado no trabalho, respectivamente de cima para baixo: SYM-H, Bz, By, Vx, densidade de prótons e clock angle. As linhas vermelhas representam o período curto mencionado durante o trabalho - Tempestade 15 com pico mínimo de SYM-H em 23/06/2015



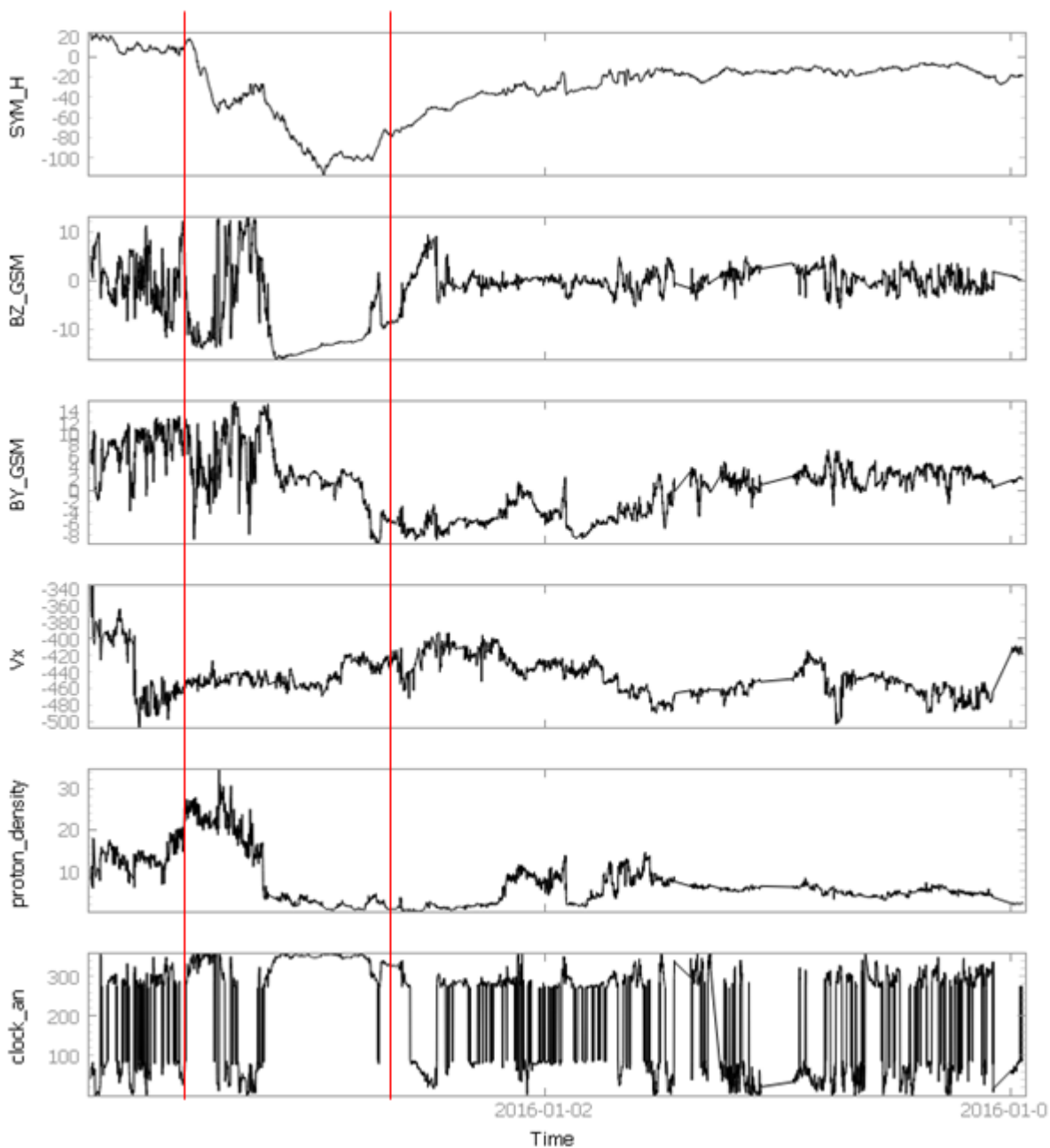
Fonte: Autor

Figura 46 – Gráfico de todos os parâmetros estudados no período longo mencionado no trabalho, respectivamente de cima para baixo: SYM-H, Bz, By, Vx, densidade de prótons e clock angle. As linhas vermelhas representam o período curto mencionado durante o trabalho - Tempestade 16 com pico mínimo de SYM-H em 20/12/2015



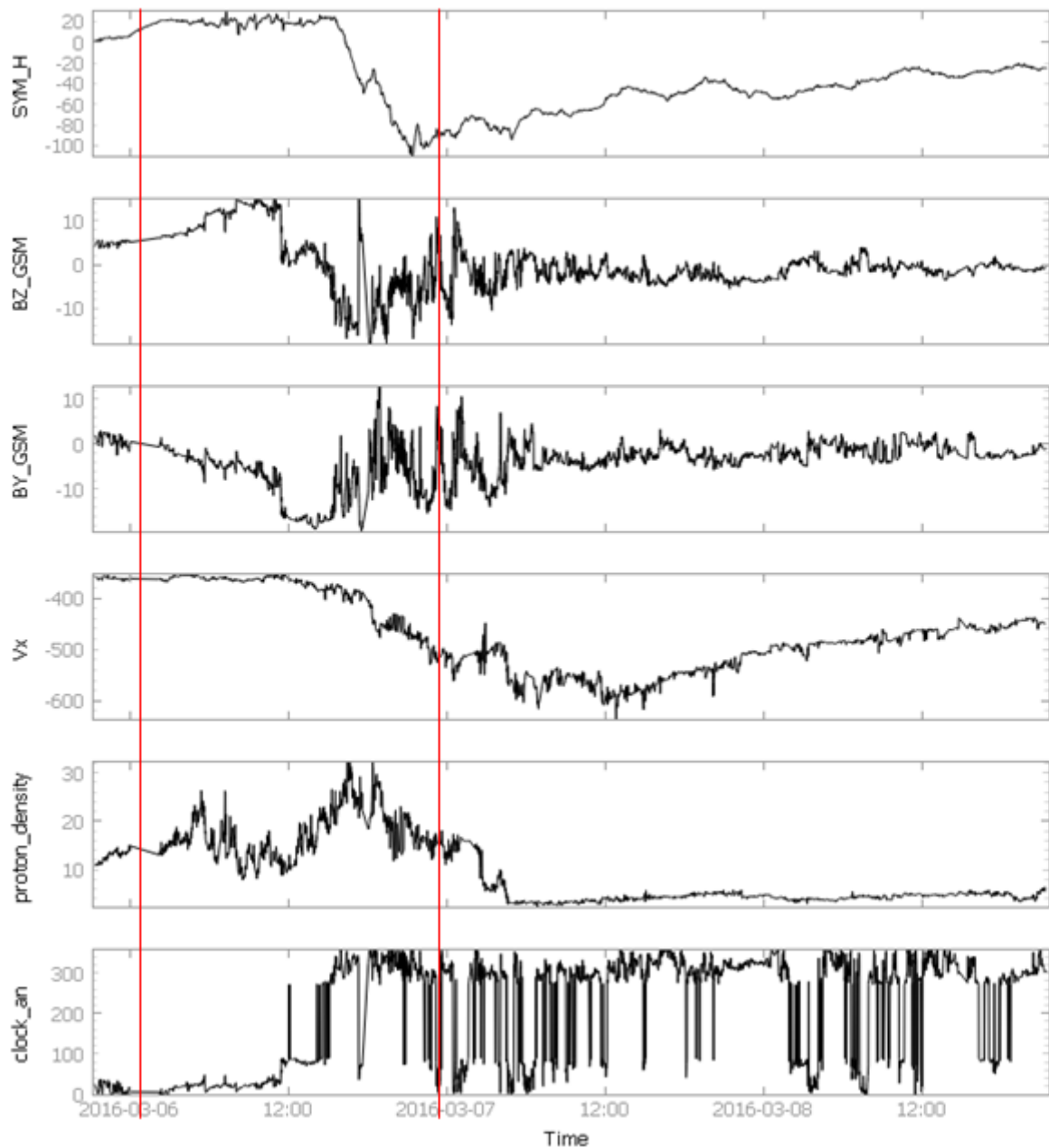
Fonte: Autor

Figura 47 – Gráfico de todos os parâmetros estudados no período longo mencionado no trabalho, respectivamente de cima para baixo: SYM-H, Bz, By, Vx, densidade de prótons e clock angle. As linhas vermelhas representam o período curto mencionado durante o trabalho - Tempestade 17 com pico mínimo de SYM-H em 01/01/2016



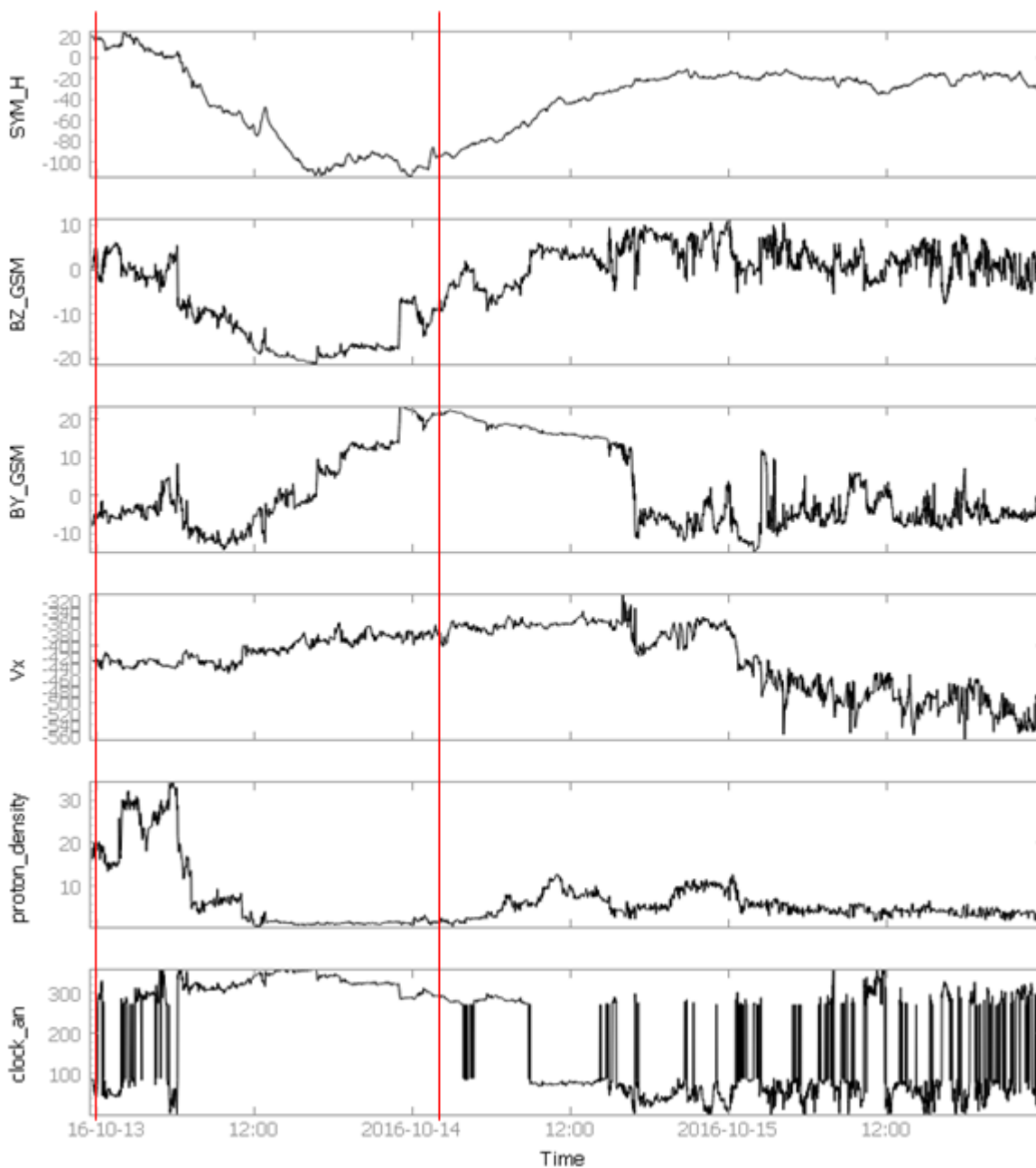
Fonte: Autor

Figura 48 – Gráfico de todos os parâmetros estudados no período longo mencionado no trabalho, respectivamente de cima para baixo: SYM-H, Bz, By, Vx, densidade de prótons e clock angle. As linhas vermelhas representam o período curto mencionado durante o trabalho - Tempestade 18 com pico mínimo de SYM-H em 06/03/2016



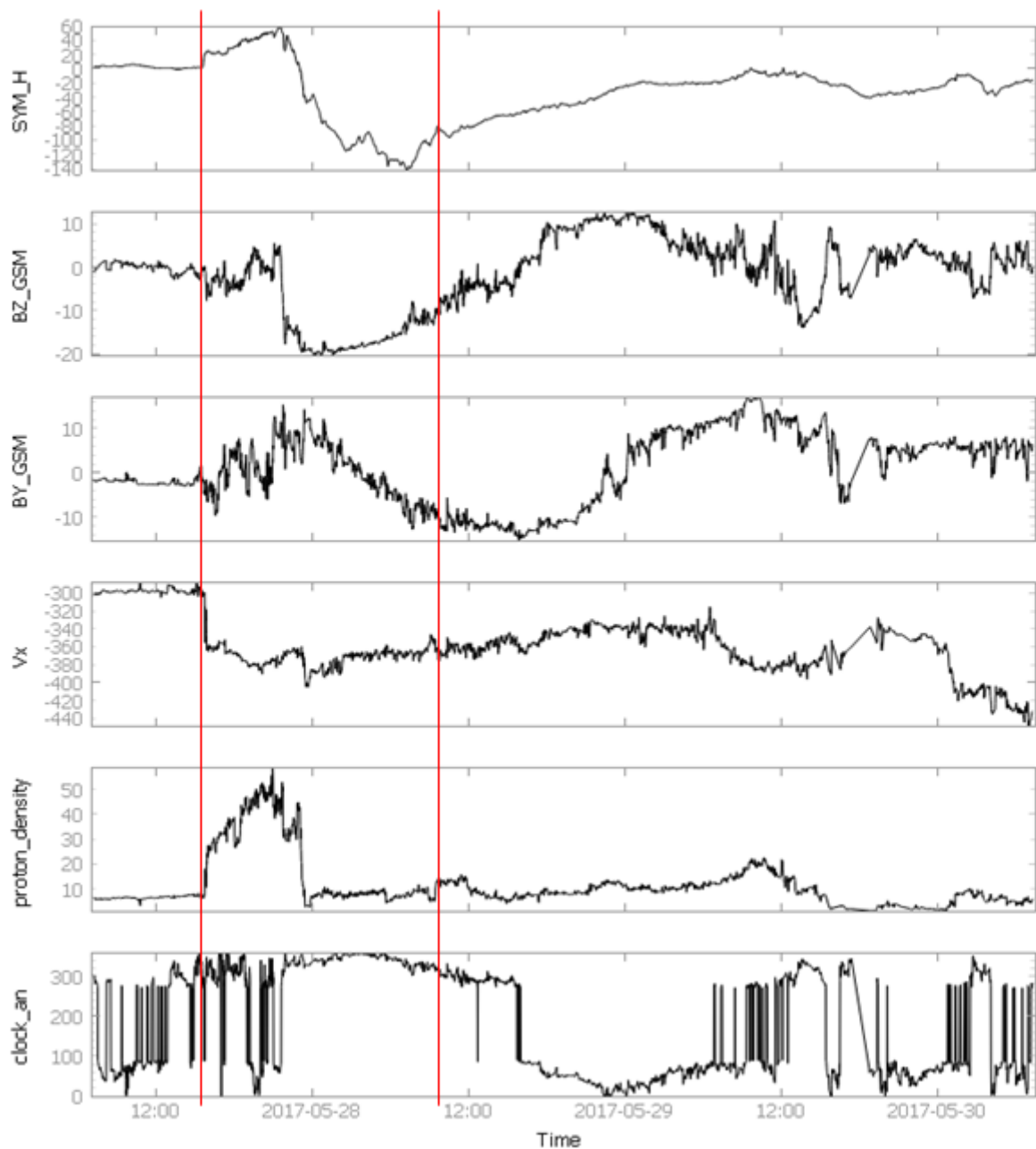
Fonte: Autor

Figura 49 – Gráfico de todos os parâmetros estudados no período longo mencionado no trabalho, respectivamente de cima para baixo: SYM-H, Bz, By, Vx, densidade de prótons e clock angle. As linhas vermelhas representam o período curto mencionado durante o trabalho - Tempestade 19 com pico mínimo de SYM-H em 13/10/2016



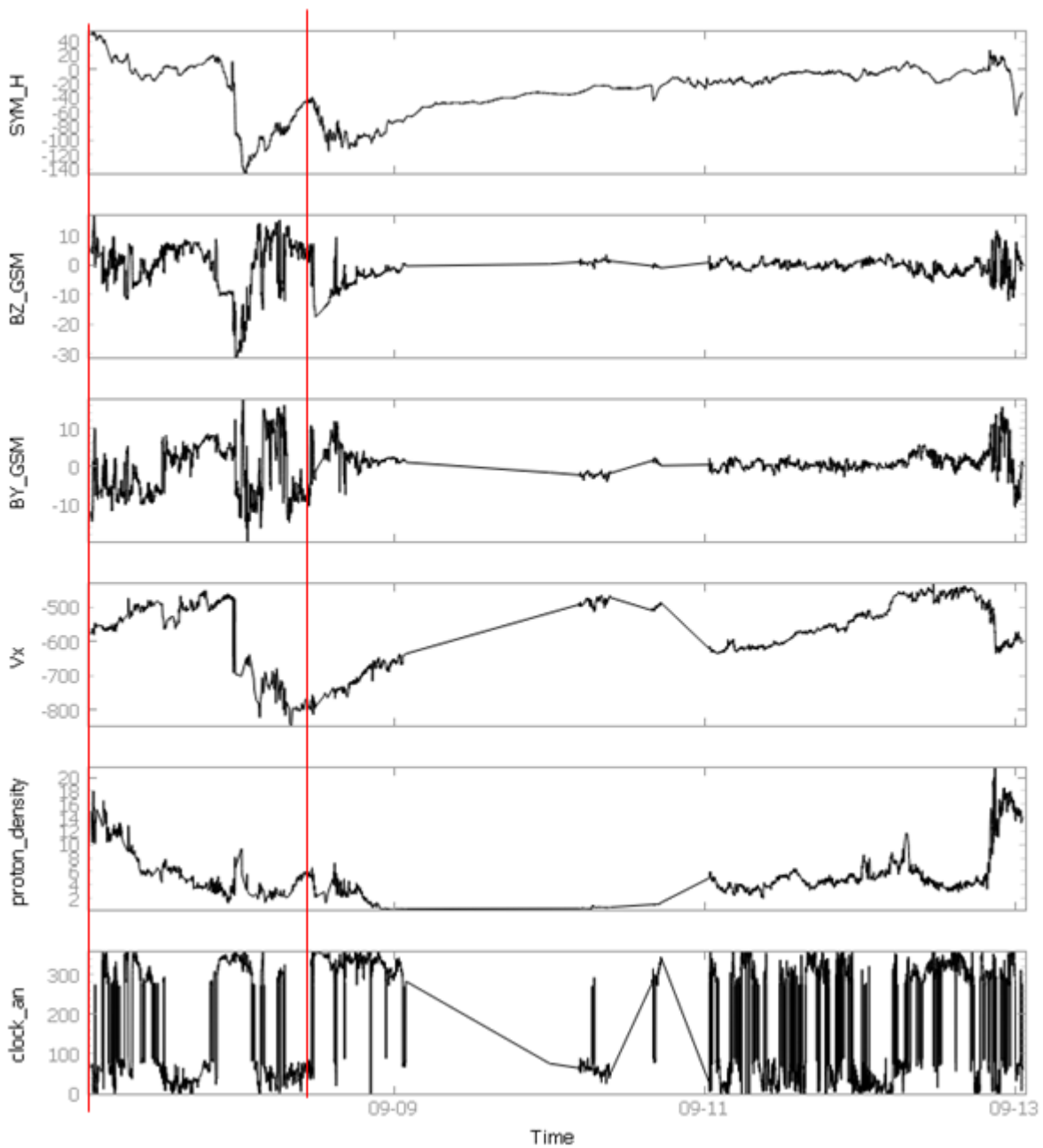
Fonte: Autor

Figura 50 – Gráfico de todos os parâmetros estudados no período longo mencionado no trabalho, respectivamente de cima para baixo: SYM-H, Bz, By, Vx, densidade de prótons e clock angle. As linhas vermelhas representam o período curto mencionado durante o trabalho - Tempestade 20 com pico mínimo de SYM-H em 28/05/2017



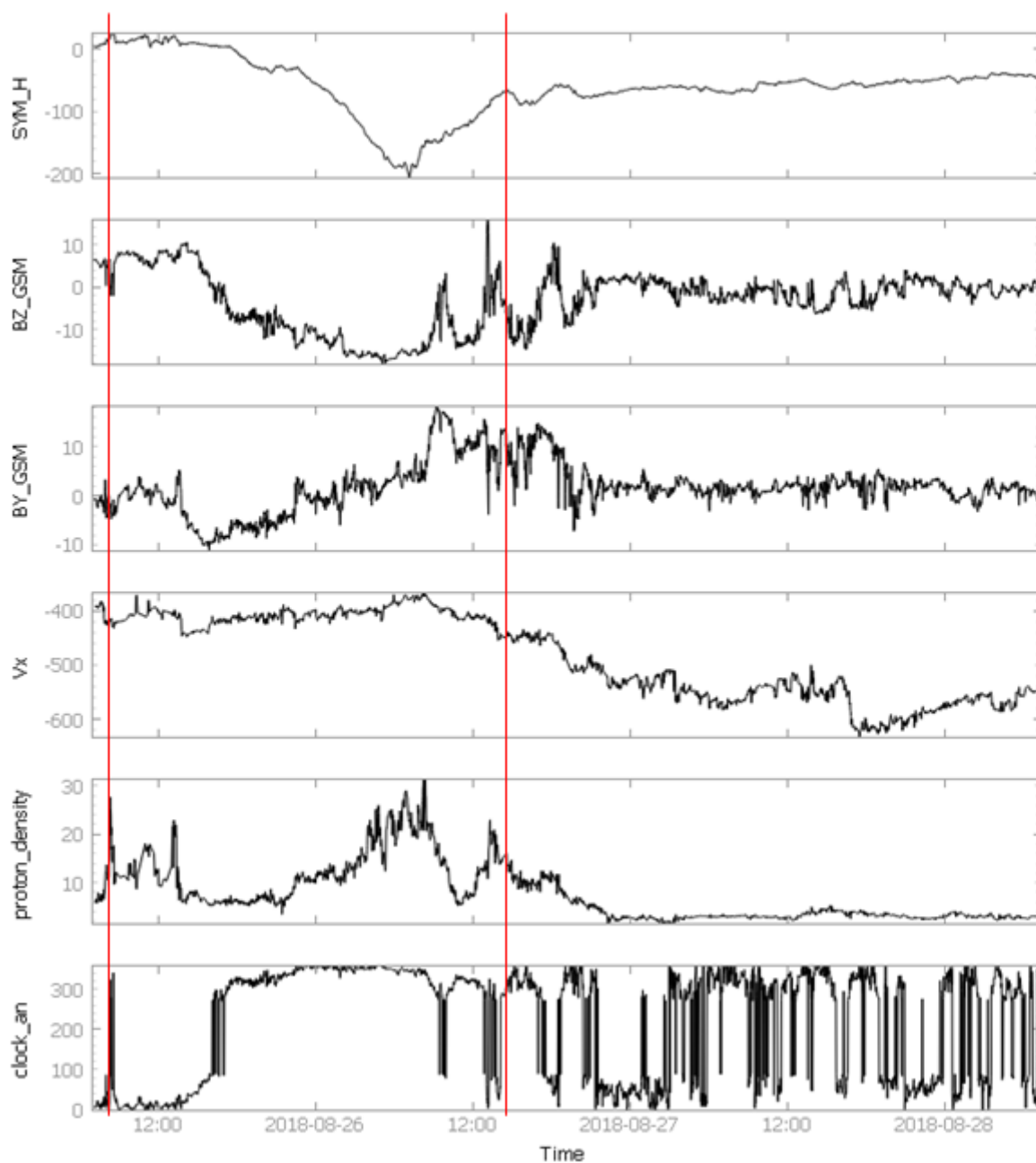
Fonte: Autor

Figura 51 – Gráfico de todos os parâmetros estudados no período longo mencionado no trabalho, respectivamente de cima para baixo: SYM-H, Bz, By, Vx, densidade de prótons e clock angle. As linhas vermelhas representam o período curto mencionado durante o trabalho - Tempestade 21 com pico mínimo de SYM-H em 08/09/2017



Fonte: Autor

Figura 52 – Gráfico de todos os parâmetros estudados no período longo mencionado no trabalho, respectivamente de cima para baixo: SYM-H, Bz, By, Vx, densidade de prótons e clock angle. As linhas vermelhas representam o período curto mencionado durante o trabalho - Tempestade 22 com pico mínimo de SYM-H em 26/08/2018



Fonte: Autor

APÊNDICE B – Rotinas em Python

B.1 Rotina de correlação simples Bz/SYM-H

Listing B.1 – Insert code directly in your document

```

import pyspedas
import numpy as np
from pyplot import tplot, get_data
import pandas as pd
from pyspedas.utilities.time_string import time_string
from scipy.stats import pearsonr
from scipy import interpolate
from matplotlib import pyplot
import matplotlib.pyplot as plt
from pyspedas import tinterpol

df=pd.read_excel('TCC_Symh_Bz.xlsx',sheet_name = 'Tempestades(2)', usecols='C:K',
, nrows=22, header=3)

DataInicio = df['Data(inicio)']
DataFim = df['Data(final)']
ListaCoef = []

for i in range(len(DataFim)):
    omni_vars = pyspedas.omni.data(trange=[str(DataInicio[i]), str(DataFim[i])],
varnames=['SYM_H', 'BZ_GSM'], time_clip=True)
    timeSymh, Symh=get_data('SYM_H')
    timeBz, Bz=get_data('BZ_GSM')
    Bzdf=pd.DataFrame({'Date':timeBz, 'Bz':Bz})

    Bzdfnan=Bzdf.dropna()

    timeBz2=Bzdfnan['Date'].to_numpy()
    Bz2=Bzdfnan['Bz'].to_numpy()

    f=interpolate.interp1d(timeBz2, Bz2, fill_value="extrapolate")
    Bz3=f(timeSymh)

    a=np.corrcoef(Symh, Bz3)
    b=a[0,1]
    ListaCoef.append(b)

print(ListaCoef)

```

B.2 Rotina de correlação cruzada Bz/SYM-H

Listing B.2 – Insert code directly in your document

```

import pyspedas
import numpy as np
from pyplot import tplot , get_data
import pandas as pd
from pyspedas.utilities.time_string import time_string
from scipy.stats import pearsonr
from scipy import interpolate
from matplotlib import pyplot
import matplotlib.pyplot as plt
from pyspedas import tinterpol

df=pd.read_excel('TCC_Symh_Bz.xlsx',sheet_name = 'Tempestades□(2)', usecols='C:O',
, nrows=22, header=3)

DataInicio = df['Data□(inicio)']
DataFim = df['Data□(final)']
LagPre= df['Lag']
Lag = LagPre.astype('int64')
ListaCoef = []

for i in range(len(DataFim)):
    omni_vars = pyspedas.omni.data(trange=[str(DataInicio[i]), str(DataFim[i])],
    varnames=['SYM_H', 'BZ_GSM'],time_clip=True)
    timeSymh, Symh=get_data('SYM_H')
    timeBz, Bz=get_data('BZ_GSM')
    Bzdf=pd.DataFrame({'Date':timeBz, 'Bz':Bz})
    print(Lag)

    Bzdfnan=Bzdf.dropna()

    timeBz2=Bzdfnan['Date'].to_numpy()
    Bz2=Bzdfnan['Bz'].to_numpy()

    print(len(Bz2))
    print(len(Symh))

    f=interpolate.interp1d(timeBz2, Bz2, fill_value="extrapolate")
    Bz3=f(timeSymh)

    lags,c, line, b=plt.xcorr(Symh, Bz3,maxlags=None)
    a=np.max(c)
    ListaCoef.append(a)

```

```
print(ListaCoef)
```

B.3 Rotina de correlação simples suavizada Bz/SYM-H

Listing B.3 – Insert code directly in your document

```
import pyspedas
import numpy as np
import pyplot
from pyplot import tplot, get_data
import pandas as pd
from pyspedas.utilities.time_string import time_string
from matplotlib import pyplot
from pyspedas.analysis.tsmooth import tsmooth
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.stats import pearsonr
from scipy import interpolate

df=pd.read_excel('TCC_Symh_Bz.xlsx',sheet_name = 'Tempestades_(2)', usecols='C:K',
, nrows=22, header=3)

DataInicio = df['Data_(inicio)']
DataFim = df['Data_(final)']
ListaCoef = []

for i in range(len(DataFim)):
    omni_vars = pyspedas.omni.data(trange=[str(DataInicio[i]), str(DataFim[i])],
varnames=['SYM_H', 'BZ_GSM'], time_clip=True)
    timeSymh, Symh=get_data('SYM_H')
    timeBz, Bz=get_data('BZ_GSM')

    pyplot.store_data('originalSymh', data={'x': timeSymh, 'y': Symh})
    tsmooth('originalSymh', width=50, new_names='SmoothSymh', preserve_nans=None)

    pyplot.store_data('originalBz', data={'x': timeBz, 'y': Bz})
    tsmooth('originalBz', width=50, new_names='SmoothBz', preserve_nans=None)

    timeSymh, SymhSmooth = pyplot.get_data('SmoothSymh')
    timeBz, BzSmooth = pyplot.get_data('SmoothBz')

    #print(SymhSmooth)
    #print(BzSmooth)

    BzSmoothdf=pd.DataFrame({'Date':timeBz, 'Bz':BzSmooth})
```

```

BzSmoothdfnan=BzSmoothdf.dropna()

timeBzSmooth=BzSmoothdfnan['Date'].to_numpy()
BzSmooth=BzSmoothdfnan['Bz'].to_numpy()

f=interpolate.interp1d(timeBzSmooth, BzSmooth, fill_value="extrapolate")
BzSmooth2=f(timeSymh)

a=np.corrcoef(Symh, BzSmooth2)
b=a[0,1]
ListaCoef.append(b)

print(ListaCoef)

```

B.4 Rotina de correlação cruzada suavizada Bz/SYM-H

Listing B.4 – Insert code directly in your document

```

import pyspedas
import numpy as np
import pyplot
from pyplot import tplot, get_data
import pandas as pd
from pyspedas.utilities.time_string import time_string
from matplotlib import pyplot
from pyspedas.analysis.tsmooth import tsmooth
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.stats import pearsonr
from scipy import interpolate

df=pd.read_excel('TCC_Symh_Bz.xlsx',sheet_name = 'Tempestades_(2)', usecols='C:K',
nrows=22, header=3)

DataInicio = df['Data_(inicio)']
DataFim = df['Data_(final)']
ListaCoef = []

for i in range(len(DataFim)):
    omni_vars = pyspedas.omni.data(trange=[str(DataInicio[i]), str(DataFim[i])],
varnames=['SYM_H', 'BZ_GSM'], time_clip=True)
    timeSymh, Symh=get_data('SYM_H')
    timeBz, Bz=get_data('BZ_GSM')

```

```

pytplot.store_data('originalSymh', data={'x': timeSymh, 'y': Symh})
tsmooth('originalSymh', width=50, new_names='SmoothSymh', preserve_nans=None)

pytplot.store_data('originalBz', data={'x': timeBz, 'y': Bz})
tsmooth('originalBz', width=20, new_names='SmoothBz', preserve_nans=None)

timeSymh, SymhSmooth = pytplot.get_data('SmoothSymh')
timeBz, BzSmooth = pytplot.get_data('SmoothBz')

#print(SymhSmooth)
#print(BzSmooth)

BzSmoothdf=pd.DataFrame({'Date':timeBz, 'Bz':BzSmooth})

BzSmoothdfnan=BzSmoothdf.dropna()

timeBzSmooth=BzSmoothdfnan['Date'].to_numpy()
BzSmooth=BzSmoothdfnan['Bz'].to_numpy()

f=interpolate.interp1d(timeBzSmooth, BzSmooth, fill_value="extrapolate")
BzSmooth2=f(timeSymh)

lags,c, line, b=plt.xcorr(SymhSmooth, BzSmooth2, maxlags=None)
a=np.max(c)
ListaCoef.append(a)
#print(lags)

pytplot.tplot(['originalBz', 'SmoothBz'])
pytplot.tplot(['originalSymh', 'SmoothSymh'])

print(ListaCoef)

```

B.5 Rotina de geração de gráficos das propriedades do vento solar e clock angle

Listing B.5 – Insert code directly in your document

```

import pyspedas
import numpy as np
from pytplot import tplot, get_data
import pandas as pd
from pyspedas.utilities.time_string import time_string
from scipy.stats import pearsonr
from scipy import interpolate
from matplotlib import pyplot

```

```

import matplotlib.pyplot as plt
from pyspedas import tinterpol
import math

df=pd.read_excel('TCC_Symh_Bz.xlsx',sheet_name = 'Tempestades', usecols='C:K',
nrows=22, header=3)

DataInicio = df['Data_(inicio)']
DataFim = df['Data_(final)']
ListaCoef = []

for i in range(len(DataFim)):
    omni_vars = pyspedas.omni.data(trange=[str(DataInicio[i]), str(DataFim[i])],
varnames=['SYM_H', 'BZ_GSM', 'BY_GSM', 'Vx', 'proton_density', 'Pressure'],
time_clip=True)

    tby, Bygsm = get_data('BY_GSM')
    tbz, Bzgsm = get_data('BZ_GSM')
    clock_an = 57.3 * np.arctan(abs(Bygsm)/Bzgsm)
    from pytpplot import store_data
    clock_an %= 360
    store_data('clock_an', data={'x': tby, 'y': clock_an})

    tplot(['SYM_H', 'BZ_GSM', 'BY_GSM', 'Vx', 'proton_density', 'Pressure', 'clock_an'])

```

B.6 Rotina de geração de gráfico de dispersão para propriedades do vento solar

Listing B.6 – Insert code directly in your document

```

import pyspedas
import numpy as np
import pytpplot
from pytpplot import tplot, get_data
import pandas as pd
from pyspedas.utilities.time_string import time_string
from matplotlib import pyplot
from pyspedas.analysis.tsmooth import tsmooth
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.stats import pearsonr
from scipy import interpolate
import seaborn as sns
from scipy import stats

```

```
df=pd.read_excel('Planilha_Main.xlsx',sheet_name = 'Tempestades_(2)', usecols='C:K',
nrows=22, header=3)
```

```
DataInicio = df['Data_(inicio)']
```

```
DataFim = df['Data_(final)']
```

```
ListaCoef = []
```

```
ScatterSymh = []
```

```
Scatterflow_speed = []
```

```
ScatterBT = []
```

```
ScatterPd = []
```

```
for i in range(len(DataFim)):
```

```
    omni_vars = pyspedas.omni.data(trange=[str(DataInicio[i]), str(DataFim[i])],
```

```
    varnames=['SYM_H', 'flow_speed', 'F', 'proton_density'],time_clip=True)
```

```
    timeSymh, Symh=get_data('SYM_H')
```

```
    timeflow_speed, flow_speed=get_data('flow_speed')
```

```
    timeBT, BT=get_data('F')
```

```
    timePd, Pd=get_data('proton_density')
```

```
    indminSymh=np.nanmin(Symh)
```

```
    indmaxflow_speed=np.nanmax(flow_speed)
```

```
    indmaxBT=np.nanmax(BT)
```

```
    indmaxPd=np.nanmax(Pd)
```

```
    ScatterSymh.append(indminSymh)
```

```
    Scatterflow_speed.append(indmaxflow_speed)
```

```
    ScatterBT.append(indmaxBT)
```

```
    ScatterPd.append(indmaxPd)
```

```
con = pd.DataFrame({'SYMh': ScatterSymh, 'flow_speed': Scatterflow_speed,
'BT': ScatterBT, 'Pd': ScatterPd})
```

```
print(con)
```

```
sns.lmplot(x="flow_speed", y="SYMh", data=con)
```

```
a = np.corrcoef(ScatterSymh, Scatterflow_speed)[1,0]
```

```
print(a)
```

```
plt.show()
```

```
sns.lmplot(x="BT", y="SYMh", data=con)
```

```
b = np.corrcoef(ScatterSymh, ScatterBT)[1,0]
```

```
print(b)
```

```
plt.show()
```

```
sns.lmplot(x="Pd", y="SYMh", data=con)
```

```
c = np.corrcoef(ScatterSymh, ScatterPd)[1,0]
```

```
print(c)
```

```
plt.show()
```