



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES



Estudo das propriedades dinâmicas dos fenômenos transientes solares nos últimos 2 ciclos de atividade

Pedro Gonçalves Teles

Relatório de Iniciação Científica do
Programa PIBIC, orientado pelo Dr. Luís Eduardo Antunes
Vieira e Dra. Claudia Medeiros

INPE
Santa Maria
2021

RESUMO

Este é um relatório da bolsa de estudo de iniciação científica do aluno Pedro Gonçalves Teles do curso de Física-Bacharelado da Universidade Federal de Santa Maria. O objeto de estudo apresentado neste relatório são as atividades que contribuíram para o entendimento do tema proposto. Estão discriminados seminários assistidos e o apresentado além de dois estudos que serviram como base de apoio para o estudo das propriedades e fenômenos solares ocorridos durante os últimos dois ciclos de atividade solar. Para isso foram utilizadas discussões encontradas em dois documentos que abordam estes temas. O primeiro é um artigo que descreveu em detalhes o evento que ocorreu na data de 07 de setembro de 2017 onde está presente uma tempestade magnética. O segundo texto referência teve como objetivo aprofundar o entendimento do que leva uma ejeção de massa coronal a causar tempestades de diferentes níveis à uma perturbação geomagnética. Estes resultados e estudos poderão ser utilizados no futuro para interpretação da base de dados do projeto de pesquisa da iniciação científica.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CMEs	-	Ejeções de massa coronal
ICME	-	Interplanetary Coronal Mass Ejection
CIR	-	Corotating Interaction Region
MC	-	Magnetic Cloud
SUNSPOTS	-	Manchas solares
Sh	-	Sheath field
SBC	-	Sector Boundary Crossing
HCS	-	Heliospheric Current Sheet

FIGURAS

Figura 1: Representação esquemática do acoplamento Sol-Terra, onde o campo magnético interplanetário e o vento solar controlam diretamente as condições do Geoespaço. Source: GSFC/NASA.	6
Figura 2: Linha do tempo dos eventos retratados em Tassev et al (2017).	9
Figura 3: Modelo WSA- ENLIL Solar Wind apresentado para o intervalo de 05 a 12 de Setembro de 2017. Adaptado de Tassev et al (2017).	10
Figura 4: Cálculo dos parâmetros do vento solar medidos pelas missões SOHO e DSCOVR localizadas no ponto Lagrangiano L1. (a e b) densidade de energia cinética, (c) densidade de energia térmica, (d) densidade de energia magnética.	12
Figura 5: Índice Kp. Source NOAA/SWPC.....	13

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	6
LITERATURA	7
DISCUSSÃO	9
SEMINÁRIOS	14
CONCLUSÃO	15
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	16

INTRODUÇÃO

Este projeto de iniciação científica trata do estudo das propriedades dinâmicas dos fenômenos transientes solares nos últimos dois ciclos de atividade. Os principais processos físicos no Geoespaço estão associados à ocorrência das tempestades magnéticas. Elas resultam do acoplamento entre o vento solar, a magnetosfera, e ionosfera, a atmosfera superior, e ocasionalmente, através de intensas correntes induzidas, a superfície terrestre [e.g., Kivelson e Russell, 1995]. A Figura 1 apresenta esquematicamente o processo de acoplamento entre o vento solar e a magnetosfera terrestre, em que o campo magnético e o vento solar afetam diretamente o Geoespaço e o sistema solar como um todo.

O estudo do sistema Sol-Terra envolve vários temas, tais como, eletrodinâmica, física de fluidos e física de plasmas, que ainda não tinham sido tratados nas disciplinas do curso de física quando o projeto iniciou. Para avançarmos, decidimos dividir o projeto em duas etapas. A primeira etapa foi uma revisão geral sobre as causas das tempestades magnéticas intensas, incluindo as suas origens solares. Em um segundo momento, estudamos um evento que ocorreu em setembro de 2017.

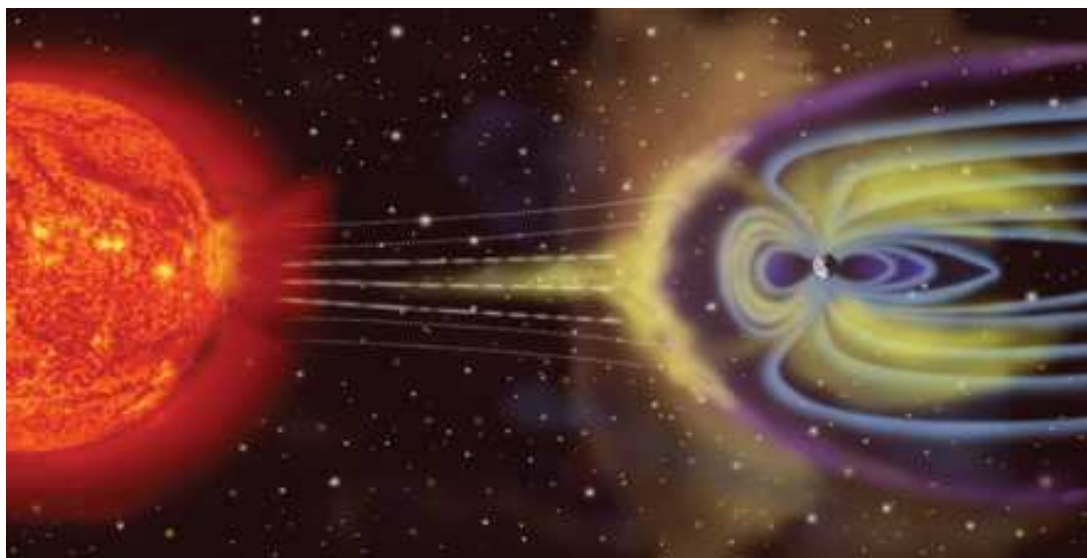


Figura 1: Representação esquemática do acoplamento Sol-Terra, onde o campo magnético interplanetário e o vento solar controlam diretamente as condições do Geoespaço. Source: GSFC/NASA.

O desenvolvimento do projeto também foi limitado devido a restrição de acesso às dependências da Universidade. A interação com pesquisadores e outros alunos de iniciação científica ocorreu através de reuniões virtuais organizadas semanalmente durante o primeiro semestre do projeto. Nessas reuniões, foram apresentados diversos seminários envolvendo temas de interesse do grupo de trabalho, incluindo física solar, engenharia de sistemas espaciais e materiais. Os seminários foram apresentados tanto pelos alunos de iniciação científica quanto por pesquisadores e alunos de pós-graduação do INPE. Uma lista dos seminários é apresentada na seção 4. Apresentamos em julho um seminário para o grupo de trabalho em Magnetosfera Terrestre da Divisão de Heliofísica, Ciências Planetária e Aeronomia. Posteriormente, apresentamos o trabalho no evento de seminários do programa de PIBIC do INPE.

Na próxima seção apresentamos uma breve revisão bibliográfica da literatura tratando dos conceitos básicos discutidos durante o desenvolvimento do projeto. Na seção seguinte, apresentamos uma discussão sobre o estudo de caso. Por fim, apresento as considerações finais.

LITERATURA

A magnetosfera terrestre é uma cavidade formada no vento solar pela interação do campo magnético terrestre com o plasma que compõe o vento solar. É altamente estruturada tanto em termos de seu campo magnético quanto de suas características de plasma [Kivelson e Russell, 1995; Parks, 1991].

O campo geomagnético é formado por correntes que fluem no núcleo da Terra. Na região externa à superfície terrestre pode ser aproximadamente representado por um dipolo magnético alinhado com o eixo de rotação [e.g., Jacobs, 1991].

O vento solar é um fluxo supersônico de plasma completamente ionizado que se move radialmente a partir do Sol. Ele resulta da grande diferença de pressão entre a corona solar e o espaço interplanetário. Esta diferença de pressão acelera o plasma da corona para o meio interplanetário, apesar da atração gravitacional exercida pelo Sol. A sua existência foi proposta

por Biermann, por volta de 1950, a partir do estudo da formação das caudas dos cometas. A existência de um fluxo de plasma contínuo foi confirmada em 1962. Medidas dos parâmetros de plasma realizadas por instrumentos a bordo de sondas descrevem detalhadamente as propriedades do vento solar desde a órbita de Mercúrio até a região próxima à heliopausa.

O plasma que compõe o vento solar é permeado pelo campo magnético interplanetário que desempenha um papel importante nos processos de interação do vento solar com a magnetosfera. Este campo magnético é a extensão interplanetária do campo magnético do Sol carregado pelo vento solar em consequência do congelamento das linhas de campo magnético no fluxo de plasma. Em uma primeira aproximação, o campo magnético solar é um dipolo estendido com o eixo aproximadamente alinhado com o eixo de rotação solar. Neste modelo simplificado as linhas de campo são aproximadamente radiais próximo ao Sol, direcionadas para o Sol acima do plano de simetria e na direção oposta abaixo do plano. A região de transição entre as linhas de campo direcionadas para o Sol e a partir deste no meio interplanetário é relativamente fina, não necessariamente planar, e é chamada de lâmina de corrente heliosférica (*heliospheric current sheet - HCS*). Assim a lâmina de corrente heliosférica divide a heliosfera em duas regiões: um hemisfério com polaridade magnética positiva e outro com polaridade magnética negativa. A polaridade do campo magnético solar depende da fase do ciclo de atividade magnética de aproximadamente 22 anos. A expansão radial do vento solar e a rotação do Sol fazem com que o campo magnético interplanetário apresente uma forma geométrica de uma espiral de Arquimedes [Burlaga, 1995].

A fronteira externa da magnetosfera terrestre, chamada magnetopausa, separa a região onde o campo geomagnético domina os processos físicos da região controlada pelo vento solar. A fronteira interna, localizada na base da ionosfera, separa a atmosfera ionizada da neutra. A ionosfera também desempenha um papel muito importante, tendo em vista que é a segunda fonte de plasma para a magnetosfera, fornecendo principalmente íons de hidrogênio, hélio e oxigênio. A magnetosfera é assimétrica. Ela é comprimida em uma face e alongada na outra direção, formando uma cauda magnética.

DISCUSSÃO

Para estudar a sequência de eventos desde a origem solar até os distúrbios do espaço próximo ao nosso planeta, selecionamos o evento que ocorreu em 7 de setembro de 2017, que foi inicialmente descrito por Tassev et al. (2018). Em setembro de 2017, o Sol esteve bastante ativo apesar de estar num período de mínima do ciclo solar 24. Várias erupções solares ocorreram ao longo do mês, porém nesse texto serão apresentados apenas os eventos relativos a tempestade geomagnética provocada pela atividade solar intensa que atingiu a magnetosfera terrestre entre os dias 07 e 10 de Setembro de 2017. Uma breve linha do tempo mostrando a sequência de eventos é retratada na Figura 2 abaixo. As regiões ativas AR2673 e AR2674 deram origem aos subsequentes flares solares e posteriormente um evento do tipo GLE (Ground level enhancements).

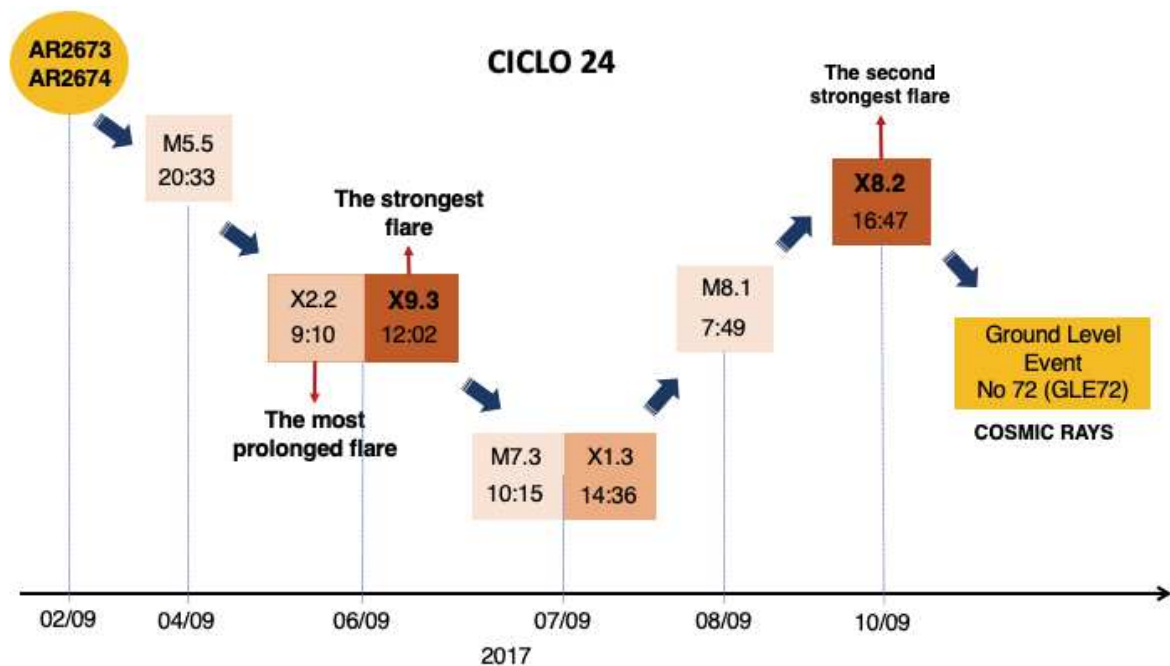


Figura 2: Linha do tempo dos eventos retratados em Tassev et al (2017).

No dia 06 de setembro de 2017 houve uma forte ejeção de massa coronal solar. Esse evento teve origem no dia 02 de setembro de 2017 na região ativa do disco solar AR2673 e AR2674 mais voltada para a direção da Terra. Nessa região houve um rápido desenvolvimento de grupos de manchas solares e flares solares, predecessores do que seriam um dos maiores flares solares do ciclo 24, conforme reporta Tassev et al., 2017. Todos esses fenômenos solares juntos

geraram um aumento súbito no número de partículas de alta energia e também de raios cósmicos de origem solar, que atingiram a magnetosfera terrestre promovendo a tempestade do tipo G4 considerada severa.

Baseado nos dados medidos pelas sondas SDO, ACE, WIND, SOHO e DSCOVR foi possível observar o meio interplanetário sendo afetado pela propagação desses eventos. Baseado nesses parâmetros medidos nos pontos L1 (Lagrangianos), dados simulados pela NOAA(WSA) usando o modelo Enlil mostraram que uma CME atingiu a magnetosfera Terra no dia 07 de setembro de 2017 (Figura 3). No painel a direita superior, é possível observar o aumento súbito da densidade de partículas do ponto de vista da Terra, assim como dois instantes de aumento da velocidade radial do vento solar (painel inferior à direita). Devido a posição desfavorável das missões Stereo A e B, ambas não observaram o evento in situ.

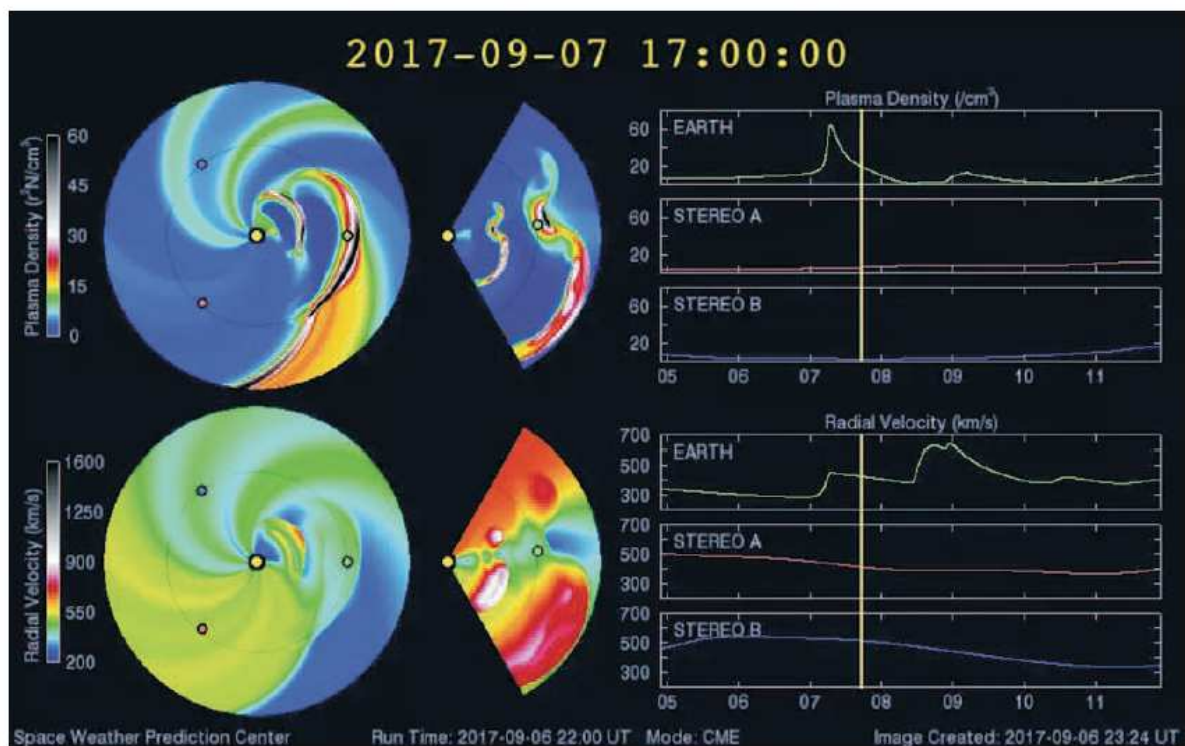


Figura 3: Modelo WSA- ENLIL Solar Wind apresentado para o intervalo de 05 a 12 de Setembro de 2017. Adaptado de Tassev et al (2017).

A energia térmica, magnética e dinâmica foram calculadas utilizando dados das missões SOHO e DSCOVR conforme observa-se na Figure 4. O aumento intenso na velocidade radial, antes próximo a 500 km/s, se elevou até 623 km/s chegando a 751 km/s. Combinado com a direção do campo magnético interplanetário (IMF) direcionado para Sul, esse primeiro choque com a magnetosfera foi extremamente geoeeficiente.

Essa perturbação do meio interplanetário permaneceu por pelo menos mais dois dias. O mais interessante foi notar que um outro evento de CME quase no limite do disco solar, sequencialmente em direção de choque perpendicular à Terra promovendo o segundo aumento súbito na velocidade radial observado. Isso leva a ocorrência de outra tempestade geomagnética no dia 10 de setembro de 2017. O satélite GOES mediu o fluxo de raios-X assim como a densidade de prótons demonstrando que mesmo não tendo direção favorável a ocorrência de tempestades severas, o halo dessa CME foi capaz de promover tais fenômenos geomagnéticos [Tassev et al., 2017].

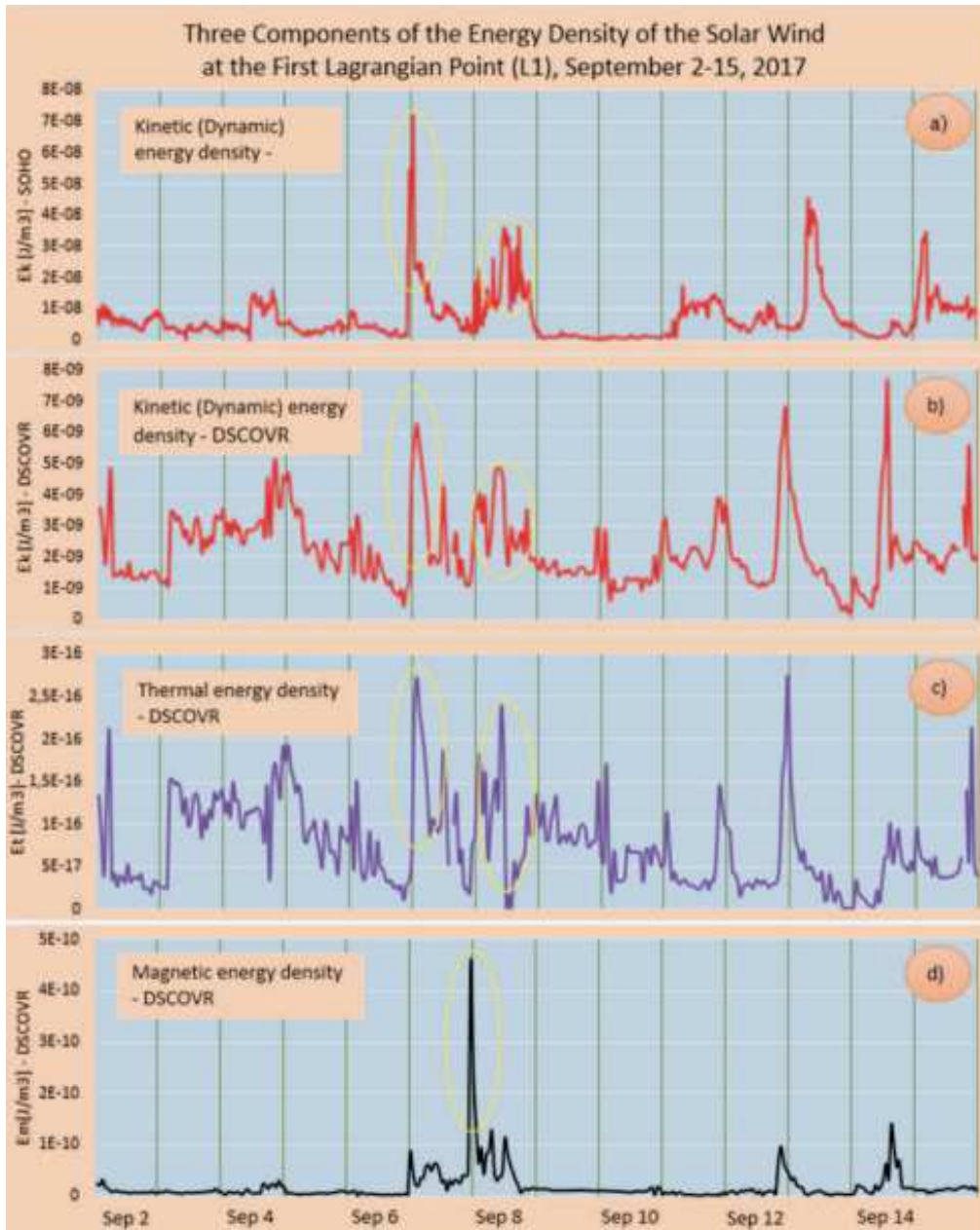


Figura 4: Cálculo dos parâmetros do vento solar medidos pelas missões SOHO e DSCOVR localizadas no ponto Lagrangiano L1. (a e b) densidade de energia cinética, (c) densidade de energia térmica, (d) densidade de energia magnética. Adaptado de Tassev et al. [2017].

A CME atingiu a Terra no dia 07 de setembro de 2017 por volta das 23:04 UTC. O índice K_p medido na Terra chegou ao nível 7, que é considerado de intensa tempestade geomagnética

mas, foi se elevando a nível 8 (tempestade severa) após a chegada da CME. A figura 4.4 mostra a variação do índice Kp entre os dias 07 e 10 de Setembro de 2017.

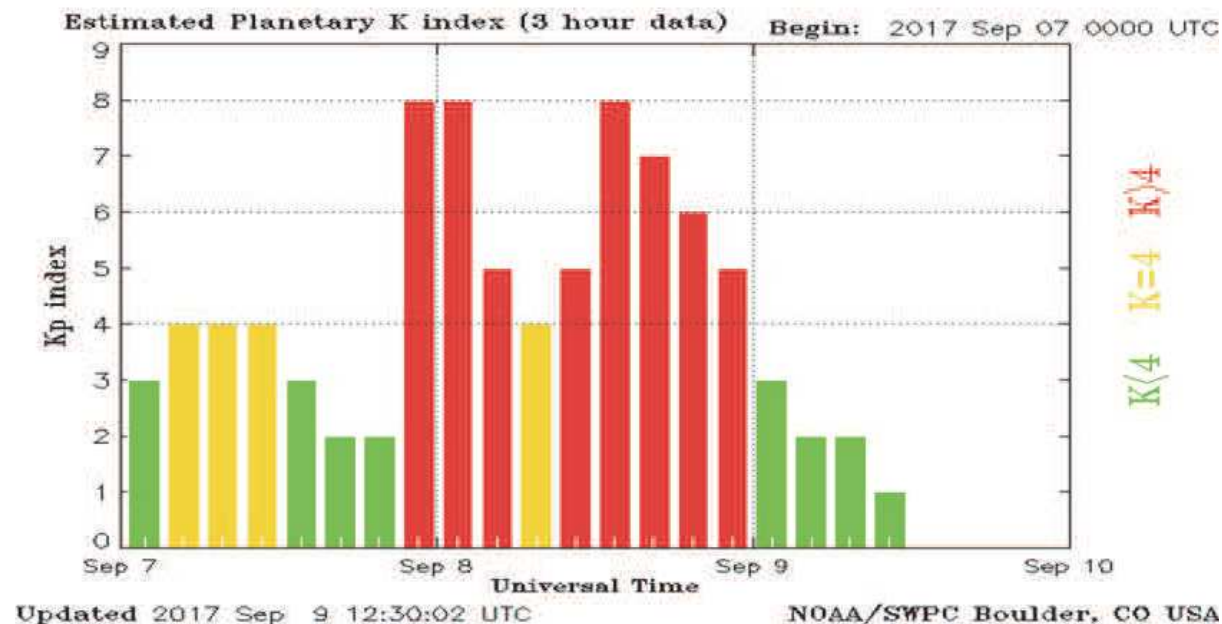


Figura 5: Índice Kp. Source NOAA/SWPC.

Todos esses eventos poderiam ter sido potencialmente mais danosos uma vez que devido a intensidade dos flares solares, poderia ser esperado vento solar com velocidade superior a 2000 km/s como ocorreu no evento de 4 de novembro de 2004. No entanto, devido a região ativa no Sol AR2673 ter atingido o limbo, apenas o seu halo atingiu nosso planeta pois está magneticamente bem conectado à Terra. Isso ocorreu devido a um fenômeno de tunelamento que permitiu que partículas fossem direcionadas para a Terra. Sensores localizados próximo aos pólos detectaram partículas na superfície. Isso caracterizou um evento raro GLE72 que havia sido reportado pela última vez em 1942 (GLE71). A provável origem do GLE72 está associada com o decréscimo do Forbush na região de Cusp Polar Sul promovido pela chegada da CME do dia 07.

Estudar esse evento foi de extrema importância pois demonstrou que mesmo em períodos de mínimo solar estamos expostos ao aumento súbito da transferência de energia cinética e magnética do Sol e, sendo assim, esses parâmetros podem ser preditores de tempestades geomagnéticas intensas. O efeito de tunelamento e a distribuição de energia durante e após a ocorrência de CMEs consecutivas se mostraram promissores nesse processo de transferência de energia. Todos esses fenômenos atingem a Terra. Uma vez que tempestades de raios

cósmicos podem alterar composição química da ionosfera e atmosfera, Tassel et al. [2017] sugere estimar valores de ionização decorrentes desses eventos e aprimorar processos de previsão de tempestades geomagnéticas.

SEMINÁRIOS

Seminários apresentados pelos demais integrantes do grupo de pesquisa

Além da apresentação do beneficiário, foi apresentado também outros seminários referentes a temas do projeto como um todo. Eles serão listados abaixo com seus respectivos seminaristas:

- 25/09 - Adriani Barbosa - Análise de incertezas na determinação dos parâmetros de Stokes.
- 08/10 - Ivan de Oliveira - Registro holográfico em cristais fotorrefrativos;
- 22/10 - Evaldo Corat - Nanotubos de carbono (NTCs);
- 23/10 - John Lehman (National Institute of Standards and Technology) - A nova geração de radiômetros utilizando nanotubos;
- 29/10 - Franciele Carlesso - Medidas de refletância de materiais absorvedores (NTCs e Black Ni-P);
- 12/11 - Ana Maria do Espírito Santo - Crescimento de cristais a partir da fusão especialmente sobre a técnica de Micro-Pulling-Down;
- 19/11 - Erica Antunes - Nanotubos de carbono e os resultados encontrados;
- 3/12 - Guilherme Noronha - Niobato de lítio;
- 17/12 - Luma Trindade - Propriedades fotorrefrativas do Niobato de lítio;
- 21/01 - Matheus Verzani - Nanotubos de carbono como materiais absorvedores;
- 04/02 - Evaldo Corat - Física moderna;
- 05/02 - Felipe Tavares - Filtros holográficos.
- 24/08 - Pedro Gonçalves Teles - Tempestade Geomagnética de 7 de setembro de 2017

CONCLUSÃO

Conclui-se que apesar de ter ocorrido imprevistos durante a realização do projeto, foi possível obter êxito e aprofundamento na literatura referente sobre as propriedades dinâmicas dos fenômenos transientes solares. Estudamos um evento específico em que foi possível acompanhar a cadeia de eventos que gerou os distúrbios no geoespaço.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Burlaga, L., E. Sittler, F. Mariani, e R. Schwenn, Magnetic Loop Behind an Inter-Planetary Shock - Voyager, Helios, and Imp-8 Observations, *Journal of Geophysical Research-Space Physics*, 86 (NA8), 6673-6684, 1981.

Dal Lago, A.; Schwenn, R.; Stenborg, G.; Gonzalez, W. D. Coronal mass ejection speeds measured in the solar corona using LASCO c2 and c3 images. *Adv. Space Res.*, v.32, n.12, p.2619-2624, 2003.

Gonzalez, W.D., Echer, E., Tsurutani, B.T. et al. Interplanetary Origin of Intense, Superintense and Extreme Geomagnetic Storms. *Space Sci Rev* 158, 69–89 (2011).

Jacobs, J.A., *Geomagnetism*, Academic Press, London, 1991.

Kivelson, M.G., e C.T. Russell, *Introduction to space physics*, pp. xv, 568, Cambridge University Press, Cambridge ; New York, 1995.

Tassev, Yordan, Velinov, Peter, Mateev, Lachezar, & Tomova, Dimitrinka (2018). Analysis of extreme solar activity in early September 2017: G4 - severe geomagnetic storm (07-0809) and GLE72 (1009) in solar minimum. *Comptes Rendus de l'Academie Bulgare des Sciences*, 70(10), 1437-1444.

SOHO LASCO CME Catalog”: https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/.

Tassev, Yordan, Velinov, Peter, Mateev, Lachezar, & Tomova, Dimitrinka (2018). Analysis of extreme solar activity in early September 2017: G4 - severe geomagnetic storm (07-0809) and GLE72 (1009) in solar minimum. *Comptes Rendus de l'Academie Bulgare des Sciences*, 70(10), 1437-1444.