

IMPACTO DA ATIVIDADE SOLAR DO DIA 28 DE JULHO DE 2012

Geovanne Petillo de Castro Boscatti (IC), Adriana Benetti Marques Valio (Orientadora)

Apoio: PIBIC Mackenzie

RESUMO

O Sol passa por períodos de grande atividade quando aumenta a ocorrência de fenômenos como manchas solares (manchas escuras na superfície do Sol), explosões solares (repentinas explosões de energia, radiação e partículas de alta velocidade) e ejeções de massa coronal (grandes ejeções de massa expelidas da atmosfera solar). Esses fenômenos podem acarretar distúrbios aqui na Terra e, portanto, é importante entendê-los a fim de mitigar as possíveis consequências no nosso planeta. Neste trabalho pretende-se estudar a explosão solar, classe M6.1, que ocorreu às 20:50 UT no dia 28 de julho de 2012, com o objetivo de compreender as possíveis consequências geradas por esta explosão. Este evento foi observado pelo rádio polarímetro POEMAS (**P**olarização de **E**missão **M**ilimétrica da **A**tividade **S**olar) em 45 e 90 GHz, foram também analisados os dados do RSTN (The Radio Solar Telescope Network), e em raio X do GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite). Neste mesmo dia de 28 de julho de 2012, houve uma ejeção de massa coronal classificada como tipo halo, alguns minutos depois da explosão solar. Os resultados da análise da explosão e da ejeção de massa são apresentados. Futuramente, pretendemos continuar a análise dos dados em rádio, com ênfase no espectro em rádio, e realizar o estudo do impacto da ejeção de massa coronal do tipo halo sobre o nosso planeta.

Palavras-chave: Sol. Explosão solar. CME

ABSTRACT

The Sun goes through periods of high activity, during which occurrences such as sunspots (dark spots on the surface of the Sun), solar flares (sudden bursts of energy, radiation, and high-velocity particles), and coronal mass ejections (large releases of mass from the solar atmosphere) become more frequent. These phenomena can cause disturbances here on Earth, making it important to comprehend them to mitigate potential consequences on Earth. This study aims to analyze the solar flare, class M6.1, that occurred at 20:50 UT on July 28, 2012, with the goal of comprehending its potential impacts on our planet. This event was observed by the POEMAS (POLarization Emission of Millimeter Activity of the Sun) radio polarimeter at 45 and 90 GHz. We also analyzed data from the RSTN (The Radio Solar Telescope Network) and X-ray observations from GOES (Geostationary Operational

Environmental Satellite). On the same day, there was a coronal mass ejection classified as a halo-type event, occurring a few minutes after the solar flare. The results of the analysis of the flare and the coronal mass are presented. In the future, we intend to focus on the radio data analysis, focusing on the radio spectrum, and investigate the impact of halo-type coronal mass ejections on our planet.

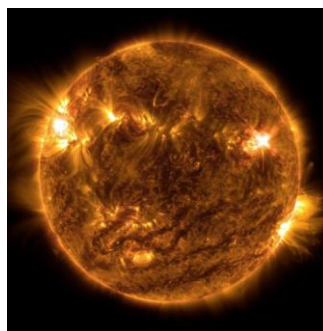
Keywords: Sun. Solar Flare. CME.

1. INTRODUÇÃO

O estudo da atividade solar é de grande importância devido ao seu impacto em nosso planeta. Entretanto, mesmo o Sol sendo a estrela mais próxima da Terra, ainda existem diversos aspectos que não são completamente entendidos, como o aquecimento coronal e a causa das explosões solares. Para elucidar estas e outras questões, as observações solares são de grande valia. Por exemplo, a observação do Sol em múltiplos comprimentos de onda permite estudar diversos fenômenos, como manchas, arcos magnéticos, explosões solares e ejeções de massa. Compreender o comportamento do Sol e os fenômenos que dele se originam, nos permite antecipar a magnitude e as possíveis consequências dessas atividades para o Sistema Solar. Além disso, a compreensão e entendimento do Sol representam um avanço significativo no estudo das outras estrelas.

As explosões solares (“*flares*”), como a apresentada na Figura 1, são repentinas explosões de energia, originadas na atmosfera do Sol, que aceleram partículas a altas velocidades. São causadas pela liberação de energia magnética armazenada principalmente na região do topo dos arcos magnéticos. Esses eventos são frequentemente associados com ejeção de massa coronal (CMEs – do inglês, *coronal mass ejections*), quando grandes quantidades de massa são expelidas da atmosfera solar. Quando a CME é direcionada à Terra, recebe a denominação de “CME Halo”, o termo “halo” é usado para descrever uma CME que é observada como uma expansão circular ao redor do disco solar quando vista a partir da Terra. Quando a ejeção de massa ocorre na direção da Terra, as partículas e campos magnéticos oriundos da ejeção podem atingir nosso planeta causando diversos danos, como apagões de energia elétrica, pane em satélites, interferência nas comunicações, perda no sinal de GPS, entre outros. Toda esta atividade solar pode afetar o clima espacial, causando tempestades geomagnéticas que afetam a Terra, portanto são constantemente monitoradas e analisadas.

Figura 1: Figura de uma explosão solar tida como de classe X. A explosão mencionada está na direita superior.



As explosões são classificadas de acordo com o pico de intensidade de raios X emitidos durante a explosão solar. As flares podem ser representadas de acordo com 5 classes (A, B, C, M e X), em escala logarítmica. A classificação começa da de menor intensidade (classe A) para a de maior intensidade (classe X), onde cada letra representa um aumento de fluxo dez vezes maior que a letra anterior. Por exemplo, a classe X é dez vezes mais potente que a classe M e 100 vezes mais potente que a classe C. As classes A e B são muito fracas para serem percebidas ou causarem algum impacto significativo na Terra. A classe M pode gerar radiação que pode colocar em perigo os astronautas. Já a classe X, como a que a Figura 1 apresenta, representa o pico de intensidade mais alto entre as flares solares. Essas flares são extremamente energéticas e podem ter um impacto significativo tanto no ambiente espacial quanto na Terra. Astronautas em órbita podem ser expostos a níveis altamente perigosos de radiação durante essas flares, representando um risco significativo para as missões espaciais tripuladas (NASA, 2017).

As ejeções de massa coronal (CME), que podem ocorrer simultaneamente às explosões, também têm potencial de gerar impacto na Terra, quando direcionadas para nosso planeta. As CMEs intensas possuem maiores chances de desencadear tempestades geomagnéticas severas, perturbando o campo magnético da Terra e potencialmente afetando redes elétricas, sistemas de telecomunicações e sistemas de distribuição de energia.

Portanto, a compreensão e monitoramento das flares e CMEs intensas são de extrema importância para a segurança das atividades humanas no espaço e para a mitigação dos impactos nos sistemas tecnológicos na Terra.

1.1 Objetivos

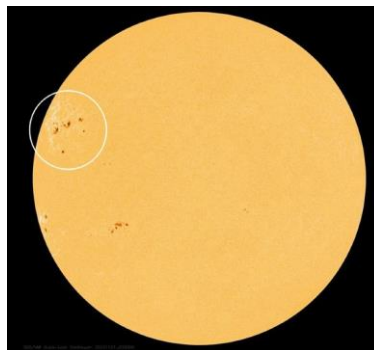
Neste trabalho analisaremos a explosão solar que ocorreu no dia 28 de julho de 2012, com o objetivo de investigar o impacto da atividade solar. Serão analisados dados dos telescópios POEMAS em 45 e 90 GHz, também serão utilizados os dados em micro-ondas da rede RSTN e a emissão em raio X detectada pelo satélite GOES. A ejeção de massa associada a esta explosão detectada pelo instrumento LASCO a bordo do satélite SOHO também será estudada. Todos estes dados serão comparados para um melhor entendimento do evento.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

O Sol é uma estrela ativa, apresentando épocas de alta atividade em que podem ser observadas muitas manchas escuras em sua superfície e outras épocas em que seu disco fica completamente livre de manchas. Durante a temporada de alta atividade diversos fenômenos energéticos e transientes ocorrem na atmosfera solar. Entre estes, os principais são as manchas, as explosões solares e as ejeções de massa coronal. A variação entre essas fases segue um período de 11 anos e está intrinsecamente relacionada ao campo magnético solar. Tanto o número de explosões quanto de ejeções de massa também segue o período de 11 anos, sendo muito mais frequentes em períodos com muitas manchas.

As regiões ativas no Sol são áreas da sua superfície onde a atividade magnética é mais intensa do que em outras partes. Essas regiões são caracterizadas por uma concentração de campos magnéticos intensos que emergem da parte interna do Sol para a sua superfície. Elas geralmente aparecem como manchas escuras, as manchas solares, nas imagens do disco solar, como apresentado na Figura 2.

Figura 2: Figura de manchas no disco solar.



Fonte: <https://www.tecmundo.com.br/ciencia/274176-15-maior-terra-mancha-sol-afetar-planeta-tempestades-solares.htm>

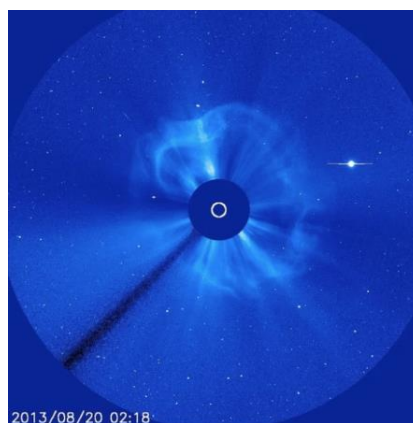
As explosões solares estão entre os fenômenos mais energéticos do Sistema Solar. Essas explosões podem durar de poucos segundos a horas, e durante esse fenômeno, ocorre uma liberação súbita de grandes quantidades de energia que aquece o plasma local e acelera as partículas até energias altíssimas, produzindo grande quantidade de radiação e partículas. As explosões solares são vistas como um intenso aumento do brilho localizado sobre uma região ativa. Estes eventos são desencadeados pela liberação rápida de energia, armazenada nos campos magnéticos fortes presentes nessas regiões. Durante um intervalo

de tempo que varia de 100 a 1000 segundos é liberada uma quantidade de energia equivalente a 20 milhões de bombas nucleares de 100 megatons, ou 10^{25} J (SILVA, 2006).

Em 1859, de maneira independente, Carrington e Hodgson fizeram a primeira observação de uma explosão solar (CARRINGTON, 1859; HODGSON, 1859), que se manifestou como um brilho concentrado em uma região específica nas imagens capturadas na faixa visível do espectro de luz solar. Dada a intensidade do brilho emitido pelo disco solar, é possível inferir que essa explosão foi de proporções gigantescas. De fato, cerca de 17 horas após o evento, a Terra foi impactada por uma significativa tempestade magnética.

As explosões solares e as CMEs são frequentemente associadas posto que ambas são manifestações de processos magnéticos intensos que ocorrem na atmosfera solar. Entretanto, enquanto os flares são flashes de luz liberados em vários comprimentos de onda, as CMEs são gigantescas nuvens de partículas expelidas permeadas por campo magnético para o meio interplanetário. Como a radiação da explosão são ondas eletromagnéticas que se propagam à velocidade da luz, estas alcançam a Terra em cerca de 8 minutos. Já as partículas das CMEs, viajam entre 200 e 2000 km/s quando saem do Sol e a matéria expelida atinge a Terra entre 2 e 4 dias em média. Quando a CME é classificada como do tipo halo, o plasma solar e o campo magnético foram expelidos do Sol na direção da Terra, formando uma estrutura que se assemelha a uma auréola ou halo ao redor do disco solar visível. Um exemplo de CME do tipo halo observada pelo SOHO LASCO C3 (Solar and Heliospheric Observatory Large Angle Spectrometric COronagraph, terceiro detector coronográfico de grande ângulo) é mostrado na Figura 3. O formato de auréola ou halo ao redor do Sol é um indicativo da direção do evento à Terra. O brilhante objeto branco a direita é o planeta Mercúrio.

Figura 3: Ejeção de massa coronal do tipo halo observada pelo SOHO LASCO.



2.1 Rádio Telescópio POEMAS

O radiotelescópio POEMAS (**PO**larização de **E**missão **M**ilimétrica da **A**tividade **S**olar) está instalado no Observatório do CASLEO na Argentina (Figura 4), e monitora o Sol diariamente em 45 e 90 GHz em duas polarizações, circular à direita e à esquerda (VALIO et al. 2013). As explosões impulsivas e intensas nas frequências de 45 e 90 GHz são fáceis de serem detectadas. Entretanto, devido a problemas de apontamento que o telescópio tem apresentado desde a sua instalação em 2011, mostrou-se necessário que os dados das explosões passem por uma cuidadosa subtração do background para melhor detecção e análise da explosão solar (VALIO 2012).

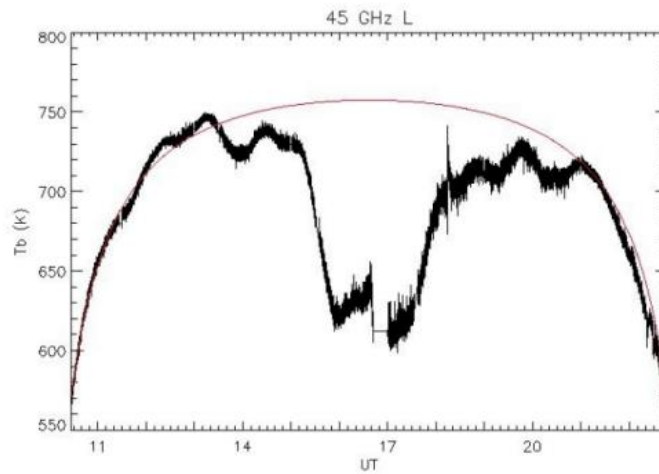
Figura 4: Rádios polarímetros POEMAS a 45 e 90 GHz,



Fonte: Acervo do Centro de Rádio Astronomia e Astrofísica (CRAAM).

Já em 2011, foi possível notar, após uma análise dos dados coletados pelos telescópios, que a temperatura de brilho medida diminuía para observações realizadas em ângulos de elevação do Sol mais elevados, especialmente acima de 50°, predominantemente entre as 15h e às 19h (UTC).

Figura 5: Temperatura de antena do Sol em 45 GHz, medida na polarização circular à esquerda, para o dia 25 de dezembro de 2011 a 45 GHz.



Fonte: VALIO, 2012.

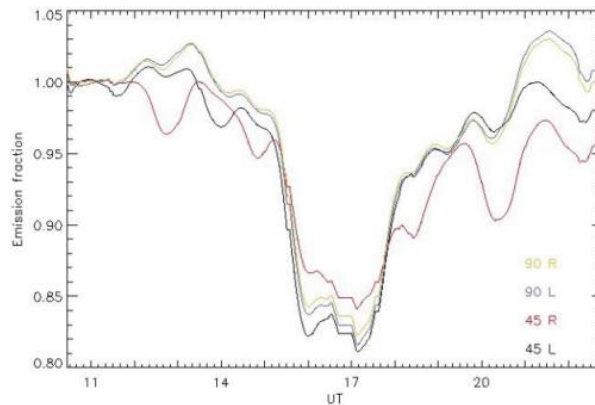
A Figura 5 mostra a temperatura de antena do Sol em 45 GHz, medida na polarização circular à esquerda, para o dia 25 de dezembro de 2011 a 45 GHz, onde a curva vermelha representa a variação esperada, que é diferente da observada (em preto) especialmente próximo ao meio-dia local, quando o Sol apresenta sua maior elevação no céu. Como pode-se observar na Figura 5, a temperatura de brilho diminui em elevações mais altas do Sol, perdendo até 20% do brilho em algumas ocasiões. Para fins de entendimento da situação observada, foi considerada a diminuição na temperatura de brilho devido à extinção de massa de ar, para $\tau = 0,06$ e $Tb_0 = 800 K$ em 45 GHz. Espera-se que a emissão varie como mostrado na curva vermelha da Figura 4, que é dada por:

$$Tb_{obs} = Tb_0 \cdot e^{-\frac{\tau}{\sin(ele)}}$$

onde '*ele*' é o ângulo de elevação do Sol.

Ao dividir a temperatura de antena esperada (curva vermelha na Figura 5) pelos dados obtidos (curva preta na Figura 5), obtém-se a fração relativa de emissão detectada pelos radiômetros, que pode ser vista na Figura 6.

Figura 6: Fração de emissão solar detectada em função do UT (Universal Time) para polarização circular à direita e à esquerda nos quatro canais detectados (45 e 90 GHz), em 25 de dezembro de 2011.



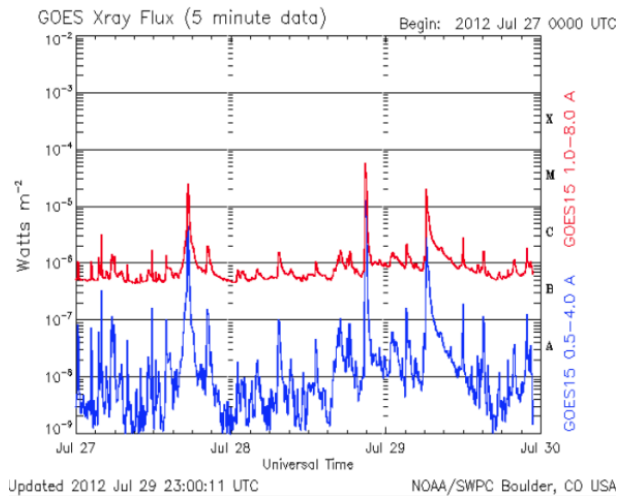
Fonte: VALIO, 2012.

Pela Figura 6 pode-se observar que a diminuição nos dados pode chegar a quase 20% perto do meio-dia local, quando o Sol está em sua elevação máxima de cerca de 80° . Esse comportamento demonstra ser semelhante para a polarização circular à esquerda em 45 GHz e para ambas as polarizações em 90 GHz.

3. METODOLOGIA

A explosão solar que ocorreu no dia 28 de julho de 2012 foi observada por diferentes telescópios em vários comprimentos de onda. Além dos dados POEMAS em 45 e 90 GHz, foram também analisados os dados do RSTN (*The Radio Solar Telescope Network*), e em raio X do GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellite*), que é um conjunto de satélites e instalações em Terra operados em conjunto pelo *National Environmental Satellite, Data, and Information Service* (NESDIS), um departamento da NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*).

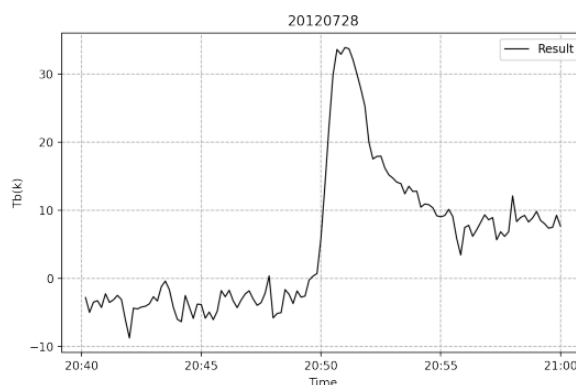
A curva de luz em raio X dos dias 27 a 29 de julho de 2012 observada pelo GOES é mostrada na Figura 7. Nota-se que a explosão mais intensa deste período ocorre por volta das 20:50 UT, e é representada pelos picos em vermelho e azul de ambas as energias em raio X. Esta explosão atingiu a classe M, sendo classificada como uma M 6.1.

Figura 7: Fluxo de Raio X em Watts/m² em função do tempo UT.

Fonte: https://solarmonitor.org/goes_pop.php?date=20120729&type=xray.

O perfil temporal da explosão em 45 GHz observada pelo POEMAS é mostrado na Figura 8. Esta explosão foi detectada por uma rede neural (RN) no trabalho de doutorado de Vanessa Lessa (LESSA 2022) e posteriormente publicado em LESSA e VALIO (2023). A Figura 8 apresenta o início da explosão solar às 20:50 UT, com duração de cerca de 5 minutos. Essa explosão foi observada nas frequências de 45 e 90 GHz para as polarizações circulares à direita e à esquerda.

Além dos dados da emissão rádio em comprimentos de onda milimétricos dos POEMAS, também serão utilizados dados de micro-ondas obtidos pela rede de rádio telescópios RSTN.

Figura 8: Perfil temporal da temperatura de antena, Tb(K), em função do tempo do evento detectado pela RN nos dados do POEMAS em 45 GHz no dia 28 de julho de 2012.

Fonte: LESSA, 2022.

O RSTN (*Radio Solar Telescope Network*) é uma rede global de telescópios projetada para estudar e monitorar a atividade solar em várias frequências. Ela é composta por várias estações de observação distribuídas pelo mundo (Figura 8), em lugares como Sagamore Hill (Massachusetts), Palehua (Hawaii), Learmonth (Australia) e San Vito (Itália) (Figura 9). Por estações terrestres como essas, o RSTN monitora a atividade solar em frequências de 245 MHz a 15400 MHz (CLIVER, 1987).

Para este trabalho, o RSTN foi escolhido por fornecer dados em diversos comprimentos de onda em diversas estações no mundo. Neste trabalho utilizamos os dados da estação de Sagamore Hill por apresentar os dados necessários da flare do dia 28/07/2012. Dentre as frequências fornecidas pela rede de telescópios, optou-se por focar especialmente nas observações em micro-ondas, isto é, acima de 1 GHz. Estas frequências estão mais próximas das do POEMAS em 45 e 90 GHz e posteriormente serão analisadas em conjunto para compor o espectro de rádio desta explosão.

Figura 9: Localização dos observatórios da rede RSTN.



Fonte: <http://www.deepsouthernskies.com/LSO/RSTN.html>.

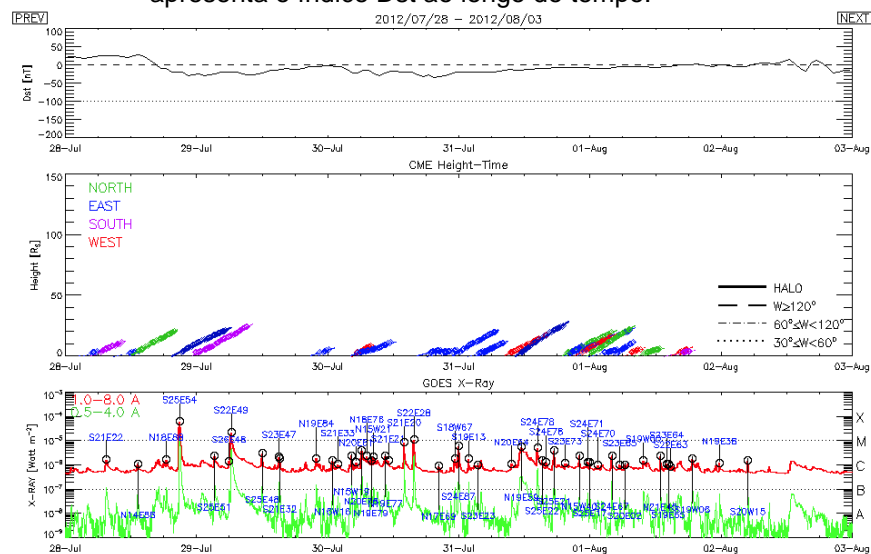
Como mencionado nas seções anteriores, ejeções de massa coronal ocorrem simultaneamente a grandes explosões, como é o caso da flare analisada neste trabalho. As ejeções de massa são observadas pelo coronógrafo LASCO a bordo do satélite SOHO. O catálogo das ejeções ocorridas desde 1996 pode ser acessado em https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list.

Neste site estão disponíveis as observações das CMEs de acordo com o dia e hora da primeira aparição nas imagens do campo C2 do coronógrafo. Os dados são disponibilizados em forma de vídeo da propagação da ejeção, assim como informação sobre medidas da altura da CME em função do tempo por até 25 raios solares, ângulo de abertura da CME e ângulo polar da direção de saída. No caso de CMEs tipo halo, este último ângulo é próximo de 360°, e são catalogadas como “halo”. Estas CMEs podem estar direcionadas

para a Terra, e ao atingir o nosso planeta têm potencial de causar perturbações como tempestades geomagnéticas.

A variação temporal do índice de tempo de tempestade de perturbação, Dst, também pode ser obtido do site do LASCO SOHO. Este é um índice relacionado ao clima espacial, que oferece informação sobre a intensidade da corrente de anel em torno da Terra, produzida por prótons e elétrons solares oriundos de uma CME. Quanto mais intensa a queda do Dst (medido em nT), mais severa a tempestade geomagnética.

Figura 10: Gráficos do índice de tempo de tempestade de perturbação, Dst. O primeiro gráfico apresenta o índice Dst ao longo do tempo.



Fonte: https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/daily_plots/dsthtx/2012_07/dsthtx_20120728.html

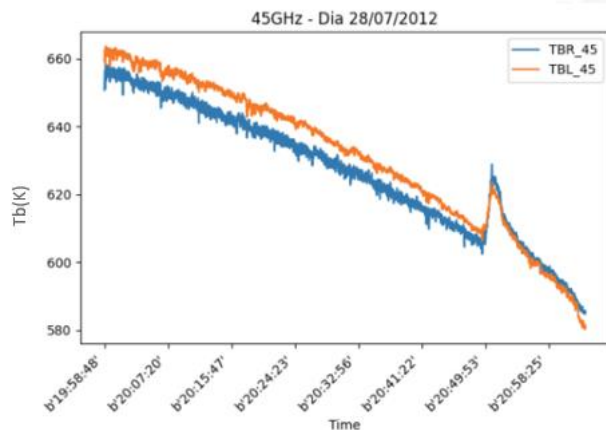
No painel superior da Figura 10, pode-se observar o gráfico do índice de tempo de tempestade de perturbação, Dst, ao longo do tempo, onde as variações negativas no índice Dst indicam a ocorrência de tempestades geomagnéticas, enquanto variações nulas indicam períodos de calma. Nota-se que ocorreram algumas tempestades geomagnéticas fracas. No segundo gráfico são mostrados gráficos da altura da CME em função do tempo durante aproximadamente uma semana. Pode-se ver a CME por volta das 21h do dia 28/07/2012 em azul. No terceiro gráfico (inferior) temos as variações dos fluxos em raios X observados pelo satélite GOES. A explosão do dia 28 de julho às 20:50 UT está marcada pela região ativa onde ocorreu: S25E54.

Para a leitura dos dados dos telescópios POEMAS e RSTN foram utilizados códigos em Python, o que permitiu a análise da *flare* do dia 28 de julho de 2012 em diferentes frequências. Esta combinação proporcionará um maior entendimento sobre o comportamento de explosões solares.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados em rádio observados pelo telescópio POEMAS nas frequências de 45 e 90 GHz foram estudados em mais detalhe. Esta análise revelou que houve um aumento da temperatura de antena a partir das 20:50 UT no dia 28 de julho de 2012 em ambas as polarizações circulares, direita (TBR_45) e esquerda (TBL_45). Esta variação pode ser observada na Figura 11, onde são mostradas a temperatura de antena em 45 GHz com a polarização circular à direita (TBR_45 em azul) e à esquerda (TBL_45 em laranja) pelo tempo UT.

Figura 11: Perfil temporal do dia 28 de julho de 2012 na polarização circular à direita e esquerda em 45 GHz.



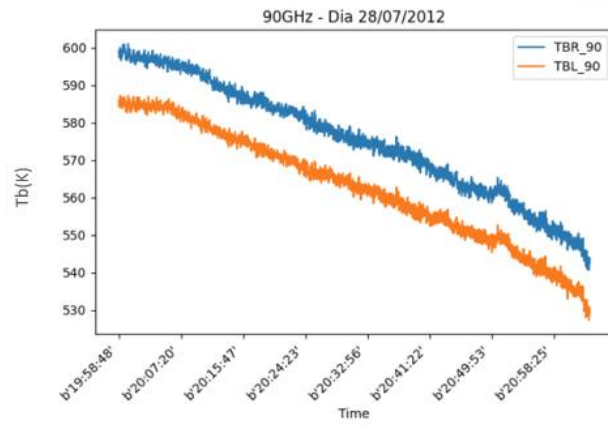
Fonte: Autor.

A temperatura de antena em 90 GHz com a polarização circular à direita (TBR_90 em azul) e à esquerda (TBL_90 em laranja) pelo tempo UT são mostradas na Figura 12, onde nota-se um ligeiro aumento da temperatura de antena por volta das 20:50 UT em ambas as polarizações.

Como os dados do POEMAS apresentam variações devido ao desapontamento do telescópio é necessário corrigir os dados. Para tanto, o dia 27 de julho de 2012 também foi analisado para ser feita a subtração do “background” e podermos analisar a explosão do dia 28. Os dados do dia anterior são mostrados nas Figuras 13 e 14, também nas polarizações circular à direita (TBR em azul) e à esquerda (TBL em laranja) em 45 e 90 GHz, respectivamente. Neste dia 27, pode-se notar a queda em temperatura de antena semelhante ao dia 28.

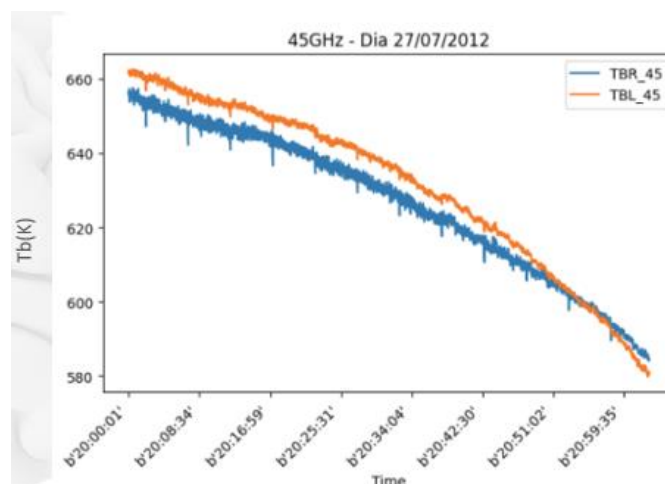
Após a leitura dos dados dos dias 27 e 28 de julho de 2012 a partir de arquivos FITS, foi realizada a subtração do background para um intervalo temporal que incluiu o horário da explosão solar. O resultado pode ser visto nas Figuras 15 e 16 para ambas as frequências de 45 e 90 GHz, respectivamente.

Figura 12: Perfil temporal da emissão em 90 GHz no dia 28 de julho de 2012 na polarização circular à direita e à esquerda.



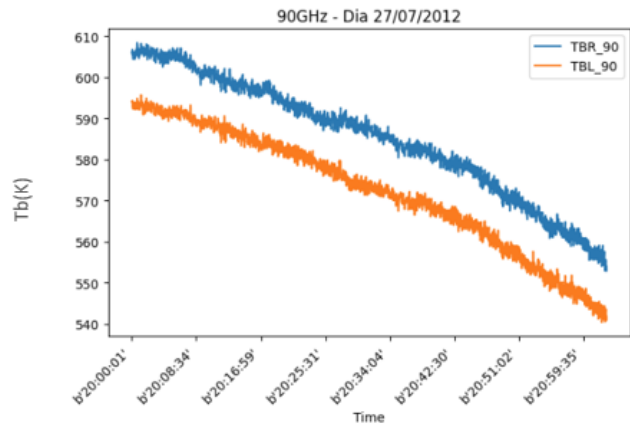
Fonte: Autor.

Figura 13: Perfil temporal da emissão em 45 GHz do dia 27 de julho de 2012 na polarização circular à direita e à esquerda.



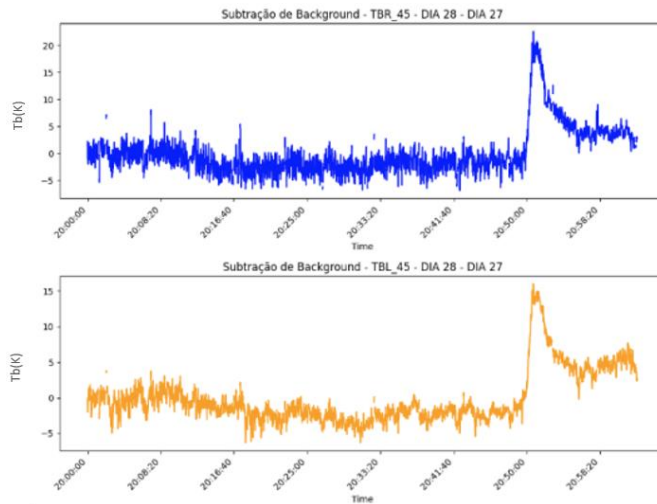
Fonte: Autor.

Figura 14: Perfil temporal da emissão em 90 GHz do dia 27 de julho de 2012 na polarização circular à direita e à esquerda.



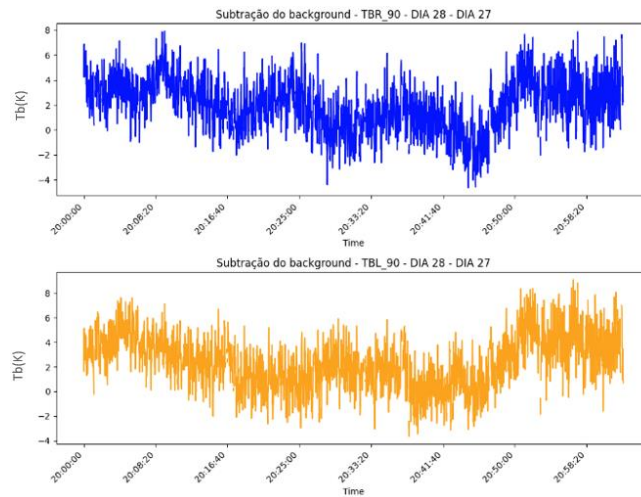
Fonte: Autor.

Figura 15: Perfil temporal da emissão em 45 GHz do dia 28 de julho de 2012 após subtração do background (isto é, da emissão do dia 27 de julho), nas polarizações circular à direita (azul) e à esquerda (laranja).



Fonte: Autor.

Figura 16: Perfil temporal da emissão em 90 GHz do dia 28 de julho de 2012 após subtração do background (isto é, da emissão do dia 27 de julho), nas polarizações circular à direita (azul) e à esquerda (laranja).



Fonte: Autor.

A subtração do background nos permitiu discernir mais claramente a variação da intensidade nos dados em rádio, permitindo a identificação do evento solar. No caso da observação na frequência de 90 GHz, os dados são mais ruidosos e a variação foi menor. Isso indica que o espectro desta explosão solar é decrescente para altas frequências, sendo a temperatura de antena menor em 90 GHz do que em 45 GHz.

A polarização circular é uma propriedade das ondas eletromagnéticas que descreve a orientação do campo elétrico em relação à direção de propagação da onda. Para observações em radioastronomia, as emissões provenientes de flares solares podem exibir polarização circular, que pode ser observada pelos telescópios POEMAS, indicando que a emissão produzida não é de origem térmica. Portanto, quando se trata de observar eventos como flares solares, a polarização circular à direita e a polarização circular à esquerda podem carregar informações valiosas sobre as propriedades das partículas e campos magnéticos envolvidos. A diferença entre as intensidades de polarização pode revelar detalhes sobre a direção e a intensidade dos campos magnéticos, bem como sobre a dinâmica das partículas carregadas no ambiente solar (SILVA et al. 2020).

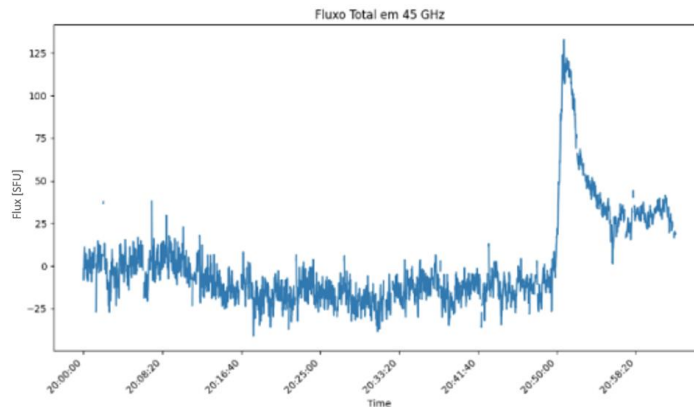
Portanto, para obter uma medida combinada da radiação total emitida durante o evento, foi calculado o fluxo total em ambas as polarizações após a subtração do background. O cálculo do fluxo para ambas as polarizações foi realizado segundo SILVA et al. (2013):

$$\text{Fluxo}(45_{\text{GHz}}) = 3,47 \frac{TBR_{45} + TBL_{45}}{2} \text{ SFU}$$

$$\text{Fluxo}(90_{\text{GHz}}) = 17,2 \frac{TBR_{90} + TBL_{90}}{2} \text{ SFU}$$

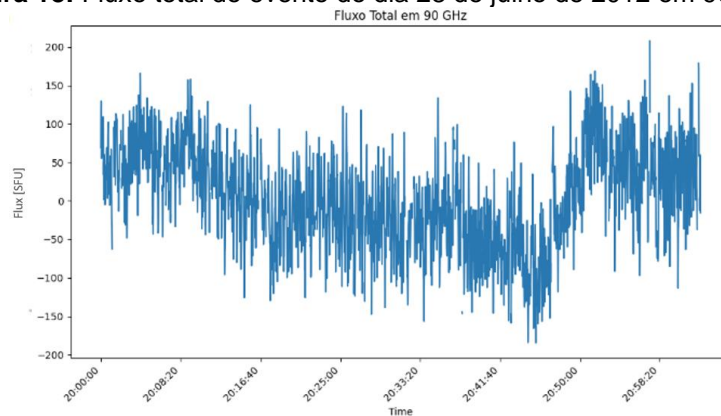
onde 1 SFU (unidade de fluxo solar) equivale a $10^{-22} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$. O resultado é mostrado nas Figuras 17 e 18 para o fluxo em 45 e 90 GHz, respectivamente.

Figura 17: Fluxo total do evento do dia 28 de julho de 2012 em 45 GHz.



Fonte: Autor.

Figura 18: Fluxo total do evento do dia 28 de julho de 2012 em 90 GHz.

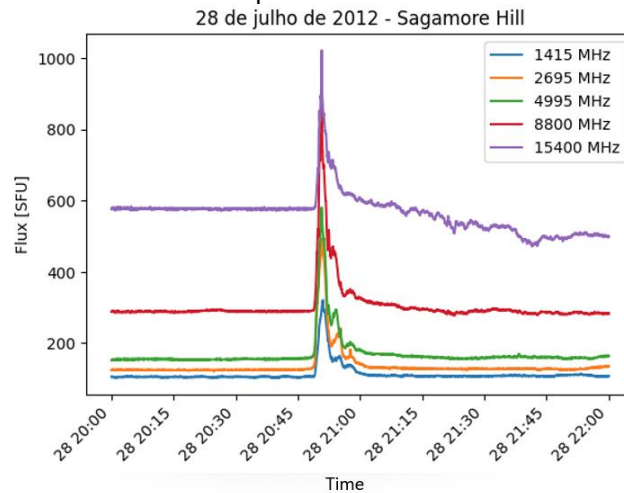


Fonte: Autor.

Para um melhor entendimento da explosão, é necessário analisar o espectro em rádio, incluindo também medidas em micro-ondas deste evento. Salientamos que a construção e análise do espectro em rádio serão realizadas futuramente. Para os dados em micro-ondas, foram também utilizados os telescópios da rede RSTN. Para o RSTN, devido

ao horário da explosão, a estação utilizada para a análise foi a de Sagamore Hill nos Estados Unidos, nas frequências de 1,4 a 15,4 GHz. Os perfis temporais da emissão em micro-ondas são mostrados na Figura 19.

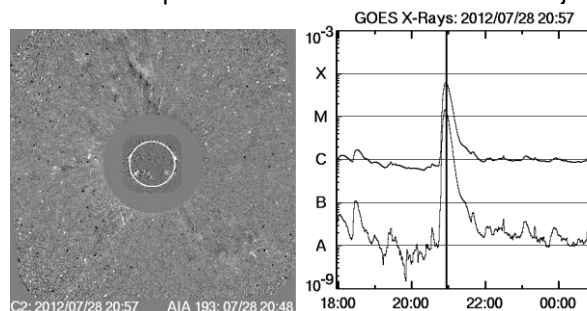
Figura 19: Explosão solar do dia 28 de julho de 2012 em diferentes frequências de rádio observadas pelo RSTN.

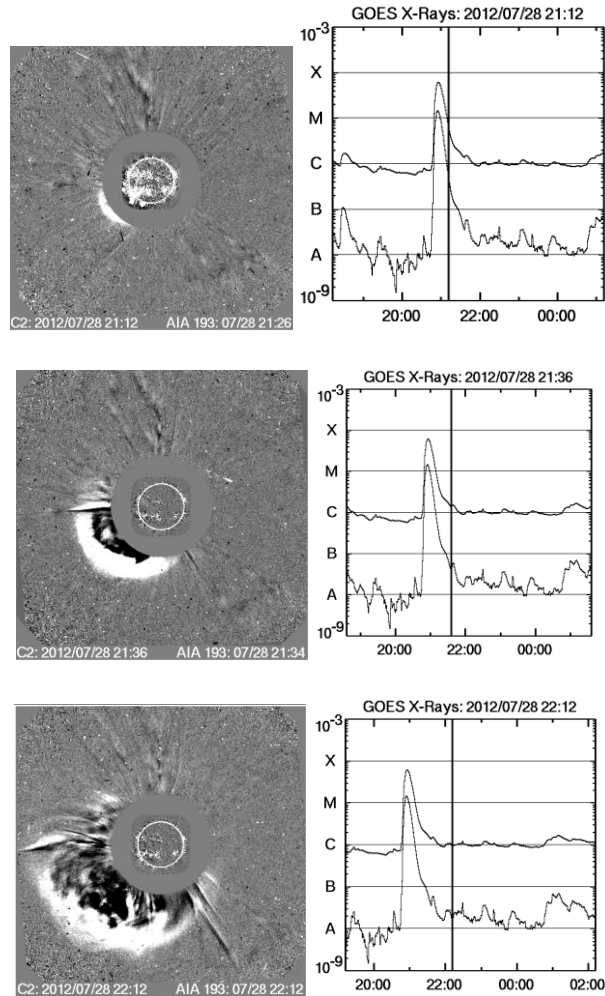


Fonte: Autor.

A fim de melhor caracterizar ainda mais a atividade solar neste dia, também procuramos pela existência de ejeção de massa coronal associada à explosão do dia 28 de julho de 2012 no catálogo do LASCO/SOHO. Descobrimos que houve uma ejeção de massa coronal, classificada como sendo do tipo halo, ou seja, foi direcionada diretamente à Terra. Nos painéis da esquerda Figura 20, pode-se observar que a detecção da CME com início às 21:12 UT, ocorreu alguns minutos após o pico da flare de classe M 6.1 (painel da direita da Figura 20).

Figura 20: Frames do vídeo apresentando a CME do dia 28 de julho de 2012.



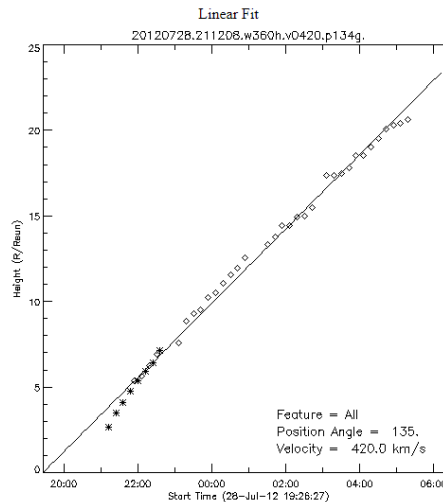


Fonte:

https://cdaw.gsfc.nasa.gov/movie/make_javamovie.php?stime=20120728_1921&etime=20120729_0107&img1=lasc2rdf&title=20120728.211208.p134g;V=420km/s

A velocidade linear média da CME foi calculada em 420 km/s, como mostrado na Figura 21. O catálogo do LASCO também estima a massa da ejeção como sendo $9,3 \times 10^{12}$ kg e sua energia cinética liberada em $8,2 \times 10^{30}$ ergs. Estas estimativas são baseadas em VOURLIDAS et al. (2000).

Figura 21: Gráfico de altura x velocidade da CME do dia 28 de julho de 2012. A CME alcançou velocidade média de 420,0 km/s.



Fonte: https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/UNIVERSAL_ver1/2012_07/htpng/20120728.211208.p134g.htp.html

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste artigo analisamos a atividade solar ocorrida no dia 28 de julho de 2012. As análises foram realizadas a partir dos dados coletados pelo telescópio POEMAS, juntamente com as observações complementares do telescópio RSTN e dos satélites GOES e SOHO, que forneceram informações valiosas. A utilização de diferentes frequências de observação permitiu uma compreensão mais abrangente dos fenômenos solares em questão. Tanto a explosão solar classificada como M 6.1 que ocorreu às 20:50 UT, detectada em rádio e raio X, quanto a CME que se seguiu foram estudadas.

Para um melhor estudo da emissão milimétrica da explosão, foi necessário subtrair o “background”, isto é, a emissão do dia anterior (27 de agosto), dos perfis temporais das polarizações circular à direita e à esquerda em 45 e 90 GHz dos dados do telescópio POEMAS, por volta das 20:50 UT do dia 28 de julho de 2012. Essa subtração permitiu identificar o perfil temporal da explosão tanto em 45 quanto em 90 GHz. As observações em temperatura de antena foram então convertidas para fluxo solar que serão adicionados aos dados em micro-ondas da rede RSTN para futura análise de espectros de emissão rádio desta explosão.

Uma ejeção de massa coronal também foi observada pelo coronógrafo LASCO. Foi uma ejeção com velocidade média de 420 km/s, próxima à velocidade média do vento solar lento. Como foi uma ejeção do tipo halo, é provável que tenha atingido a Terra em cerca de

4 dias, dada a sua velocidade. O impacto desta CME sobre a Terra também será analisado futuramente.

A combinação de diferentes fontes de dados, incluindo o rádio telescópio POEMAS, a rede RSTN, os satélites GOES e SOHO, aprimorou a compreensão da atividade solar ocorrida nesse período. Observações do GOES classificou esta explosão como M 6.1 quanto a seu nível de energia liberada. Os dados em altas frequências de rádio do POEMAS (45 e 90 GHz) combinados aos dados em micro-ondas da rede RSTN fornecerão o espectro da explosão, contendo informações valiosas sobre os mecanismos da emissão rádio e provavelmente sobre os campos magnéticos envolvidos também. A ejeção de massa coronal (CME) associada ao evento solar, bem como sua direção e velocidade, também desempenhou um papel crucial na compreensão da dinâmica envolvida. A classificação da CME como do tipo halo e sua direção direta à Terra reforçam a natureza complexa e imprevisível da atividade solar.

Futuramente, pretendemos continuar a análise dos dados em rádio, principalmente do espectro rádio. Também desejamos estudar o impacto da ejeção de massa coronal do tipo halo sobre o nosso planeta. Estes estudos são cruciais para uma maior compreensão da atividade solar.

6. REFERÊNCIAS

- Carrington, R. C. (1859). **Description of a Singular Appearance seen in the Sun on September 1, 1859**. Monthly Notes of the Royal Astronomical Society **20**, 13.
- Cliver, E W, Gentile, L C, and Wells, G D. **RSTN (Radio Solar Telescope Network) observations of the 16 February 1984 cosmic-ray flare**. United States: N. p., 1987. Web.
- Hodgson, R. (1859). **On a curious appearance seen in the Sun**. Monthly Notes of the Royal Astronomical Society **20**, 15.
- Lessa, V.: (2022). **Detecção automática de explosões solares em 45 e 90 GHz observadas pelos poemas**. Tese de Doutorado.
- Lessa, V. e Valio, A. (2023). **Automatic detection of solar flares observed at 45 GHz by the POEMAS telescope**. Astronomy and Computing, 44, 100738
- NASA. (2017, 7 de agosto). How to Classify Solar Flares. Retirado de https://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/news/classify-flares.html
- Silva, A. V. R. (2006). **Nossa Estrela: o Sol**. Ed. Livraria da Física
- [Silva, D. F., Simões, P. J. A. Hida,Igo Ramirez, R. F., Válio, A. \(2020\) Inferring the Magnetic Field Asymmetry of Solar Flares from the Degree of Polarisation at Millimetre Wavelengths. Solar Physics, 295\(6\), article id.73](#)
- Valio, A. (2012). **Solar Patrol Polarization Telescope at 45 and 90 GHz**. Relatório Parcial do projeto FAPESP 2009/50637-0. Setembro de 2012.
- Valio, A. (2013). **Solar Patrol Polarization Telescope at 45 and 90 GHz**. Relatório Final do projeto FAPESP 2009/50637-0. Abril de 2013.
- Valio, A., Kaufmann, P., Giménez de Castro, C. G., Raulin, J. -P., Fernandes, L. O. T., Marun (2013). A. **POLarization Emission of Millimeter Activity at the Sun (POEMAS): New Circular Polarization Solar Telescopes at Two Millimeter Wavelength Ranges**. Solar Physics, 283(2), 651-665
- Vourlidas, A., Subramanian, P., Dere, K. P., Howard, R. A. (2000) **Large-Angle Spectrometric Coronagraph Measurements of the Energetics of Coronal Mass Ejections**. The Astrophysical Journal, 534 (1), 456-467.

Contatos: e-mail aluno: 32108117@mackenzista.com.br

e-mail orientador: avalio@craam.mackenzie.br