



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**PROGRAMA INSTITUCIONAL DE BOLSAS DE INICIAÇÃO
CIENTÍFICA/PIBIC/CNPq**

PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA:

**INVESTIGAÇÃO DE FENÔMENOS SOLARES ENERGÉTICOS E
DESENVOLVIMENTO DE MÉTODOS PARA PREVISÃO DE SUA
OCORRÊNCIA**

BOLSISTA:

Roberta Camilly Freitas de Carvalho

ORIENTADOR:

Dr. José Roberto Cecatto

PERÍODO:

Junho/2023 - Agosto/2023

**FÍSICA DO MEIO INTERPLANETÁRIO – FMI
DIVISÃO DE ASTROFÍSICA – DIDAS
COORDENAÇÃO DE CIÊNCIAS ESPACIAIS / ATMOSFÉRICAS -
CGCEA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS - INPE**

São José dos Campos

2023

AGRADECIMENTOS

Professor Dr. José Roberto Cecatto, agradeço pela oportunidade de estar me orientando no processo de desenvolvimento deste trabalho, estando sempre presente: orientando e auxiliando. Ao INPE pela oportunidade de realização deste projeto, com o professor orientador. Ao CNPq pela bolsa PIBIC concedida. Gratidão pelo apoio que a minha mãe, Denise Suely de Freitas me proporciona com todas as dificuldades.

INVESTIGAÇÃO DE FENÔMENOS SOLARES ENERGÉTICOS E DESENVOLVIMENTO DE MÉTODO PARA PREVISÃO DE SUA OCORRÊNCIA

Roberta Camilly Freitas de Carvalho¹ (USP, Bolsista PIBIC/CNPq)

José Roberto Cecatto² (DIAS/CGCE, Orientador)

RESUMO

As explosões – “flares” – solares são fenômenos energéticos gerados nas chamadas regiões ativas, localizadas na alta cromosfera / baixa coroa, e que se caracterizam por valores elevados de temperatura e densidade, relativamente à atmosfera solar circundante, e campos magnéticos intensos (centenas a poucos milhares de Gauss) na forma de arcos magnetizados. Esses fenômenos correspondem à liberação repentina de uma grande quantidade de energia ($10^{24} - 10^{32}$ erg) que se manifesta na forma de aquecimento do plasma e energização de partículas. O plasma aquecido se torna mais brilhante e as partículas energizadas formam feixes que se propagam pelos arcos magnéticos produzindo radiação eletromagnética de amplo espectro (desde ondas de rádio a raios-X e gama), que quando no ambiente terrestre, pode afetar serviços/sistemas tecnológicos causando por exemplo blecaute nas comunicações de rádio e perturbação dos sinais de GPS, entre outros efeitos. O fenômeno é detectado apenas quando já se encontra no ambiente terrestre, e assim não existe tempo suficiente para a tomada de qualquer medida protetiva dos serviços / sistemas tecnológicos. Sendo assim, com o objetivo de evitar ou minimizar os efeitos que esses fenômenos causam é necessário prever sua ocorrência com antecipação suficiente – 1-2 dias. Com o intuito de desenvolver um método que auxilie na previsão desse fenômeno, estamos realizando um levantamento de parâmetros e índices solares de forma a gerar um modelo empírico de previsão. Apresentamos alguns resultados preliminares desse levantamento. Para o intervalo Jan./1996 a Dez./2000 do ciclo de atividade solar 23, foram registrados 39 “flares” classe X e 470 “flares” classe M. Os “flares” M e X são observados apenas para níveis base do fluxo integrado de raios-X (1-8 Å) de 1×10^{-7} W/m² e 2×10^{-7} W/m², respectivamente. Os mesmos eventos são observados apenas para níveis base da densidade de fluxo rádio (em 10.7cm) integrada de 85×10^{-22} W.Hz⁻¹.m⁻² e 90×10^{-22} W.Hz⁻¹.m⁻², respectivamente, os quais correspondem a 85 UFS (Unidades de Fluxo Solar) e 90 UFS.

Palavras-chave: Sol, Explosões solares, Caso geral.

¹ Aluno (a) do curso de bacharelado em engenharia química - **E-mail:**

² Pesquisador (a) do INPE - **E-mail:** jr.cecatto@inpe.br

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1:

Fig. 2:

Fig. 3:

Fig. 4:

Fig. 5:

Fig. 6:

Fig. 7:

SUMÁRIO

- 1. Introdução**
- 2. Desenvolvimento**
 2. 1 Resultados preliminares
- 3 . Conclusão**

1. Introdução

O Sol apresenta ciclos de atividade cuja duração média é de 11 anos. O ciclo se caracteriza pela variação correlacionada dos seguintes parâmetros solares: irradiância total, número manchas e grupos de manchas, fluxo da emissão rádio em 10.7cm e número de "flares". No início de um ciclo, uma ou poucas manchas pequenas surgem na fotosfera em latitudes moderadas (30-40 graus). Conforme o ciclo segue pela fase ascendente até o máximo, as manchas gradualmente passam a ocorrer em grupos e crescer em número e área e se apresentam em latitudes mais próximas ao equador solar. Os parâmetros correlacionados evoluem simultaneamente, principalmente o número de "flares".

Na fase de máximo do ciclo, as manchas ou seus grupos apresentam-se com sua maior frequência e área, e os "flares" associados, observados nas regiões ativas da atmosfera solar, também tornam-se mais frequentes. De meados da fase ascendente, passando pelo máximo, até meados da fase de decaimento, são observados os "flares" de moderada (classe M) e grande ou extrema (classe X) intensidades. Esses fenômenos se apresentam como uma liberação repentina, rápida e intensa de grande quantidade (10^{24} - 10^{32} erg; típico 10^{27} erg) de energia magnética, observada em uma região ativa da atmosfera solar (alta cromosfera/ baixa coroa), localizada no arco magnético. Essa energia liberada, ocorre devido a reconexão magnética que provoca o aquecimento do gás e a aceleração de feixes de partículas energizadas, as quais se manifestam respectivamente como um abrilhantamento do gás e também como explosão de radiação eletromagnética em amplo espectro (rádio a raios-X/gama).

Quando o "flare" ocorre na atmosfera solar, emite uma grande quantidade de radiação eletromagnética, que se propaga em direção a terra na velocidade da luz. Essa radiação eletromagnética quando chega na Terra causa, entre outros efeitos, perturbação da órbita de satélites, e distúrbios ou blecaute na radiocomunicação. Entretanto, o sensor do satélite que detecta esse fenômeno está em órbita da Terra. Logo, quando detectado o "flare" já atingiu a Terra causando seus efeitos, e assim não existe tempo hábil para evitar ou minimizar esses efeitos no ambiente, bem como serviços / sistemas tecnológicos terrestres.

Devido a esses efeitos e correspondentes impactos, o objetivo deste projeto é desenvolver métodos para detectar com antecedência a ocorrência da explosão / "flare" solar, através da análise de dados sobre sua origem e as principais características, com o intuito de permitir ações preventivas ou mitigantes.

2. Desenvolvimento

O Sol é a principal fonte de energia para o sistema climático terrestre, emitindo energia na forma de radiação eletromagnética em amplo espectro (rádio a raios - X / gama). Como é conhecido, durante a fase de máximo do ciclo também cresce a ocorrência de fenômenos energéticos, principalmente os “flares” ou explosões solares. Um exemplo é mostrado na Figura 1.

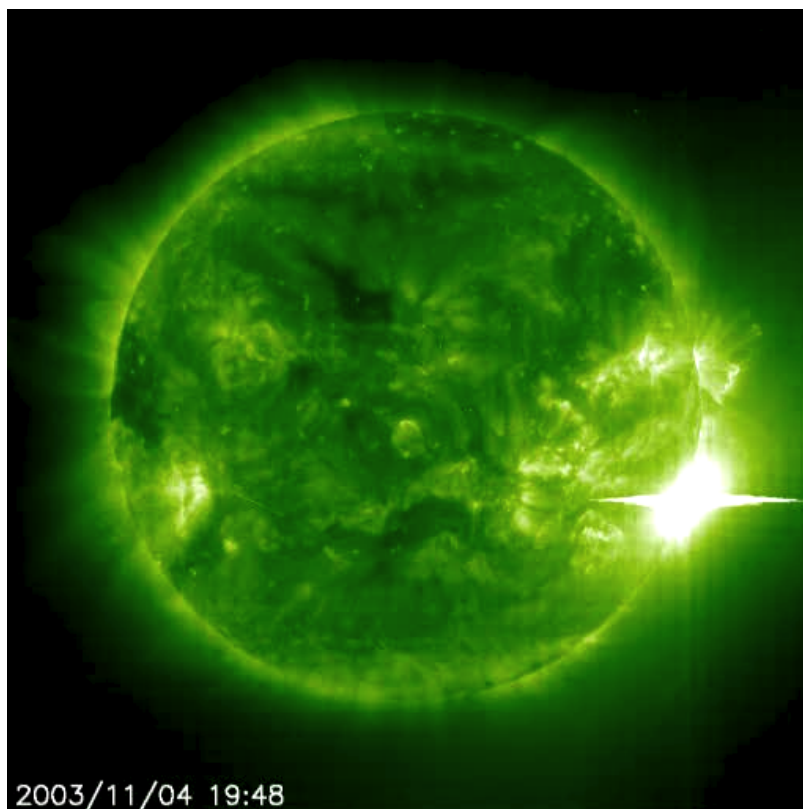


Fig. 1 - Explosão solar observada em EUV (SOHO-EIT/ NASA 195 A).

FONTE: Space Weather (Janeiro, 2000)

As explosões solares foram descobertas em 1º de setembro de 1859, por R. C. Carrington e R. Hodgson, quando eles observavam grupos de manchas solares na luz visível. Esse fenômeno se configura pela emissão de grande quantidade de energia (10^{24} - 10^{32} erg; típico 10^{27} erg), em períodos de tempo relativamente curtos, de dezenas de segundos até poucas horas para os fenômenos de maior intensidade. A energia cinética/ térmica liberada no “flare” tem origem da reconexão magnética que ocorre numa região ativa da atmosfera solar. Uma fração das regiões ativas presentes no Sol apresenta um caráter dinâmico que gera o estiramento e a torção das linhas de campo de seus arcos magnéticos armazenando energia no campo. Eventualmente, também pode ocorrer cisalhamento e a reconexão de linhas de campo magnético da região ativa, o que libera a energia armazenada causando o “flare” ou explosão solar. Toda essa energia liberada provoca o aquecimento do gás e aceleração de feixes de partículas energizadas. A interação dessas partículas com o ambiente da região ativa gera

radiação eletromagnética de amplo espectro desde ondas de rádio quilométricas a raios - X e raios-gama.

As regiões ativas estão localizadas na alta cromosfera e baixa coroa onde existe o predomínio dos campos magnéticos. A configuração geométrica exata de um arco magnético pode variar desde um arco único a um conjunto de arcos não alinhados e muito complexos. Um dos modelos mais simples encontrados na literatura é o das linhas de campo magnético na forma de arcos devido a um dipolo magnético profundo na atmosfera, como está sendo ilustrado na Figura 2. E os arcos magnéticos estão associados a grupos de manchas solares observados na fotosfera. Neste tipo de configuração, temos então duas regiões que destacamos: o topo do Arco e a base do Arco, onde a densidade no topo do arco será menor e na base será maior. Além disso, o gás mais quente e denso do que a atmosfera das vizinhanças se apresenta brilhante, evidenciando as linhas do campo magnético da região ativa.

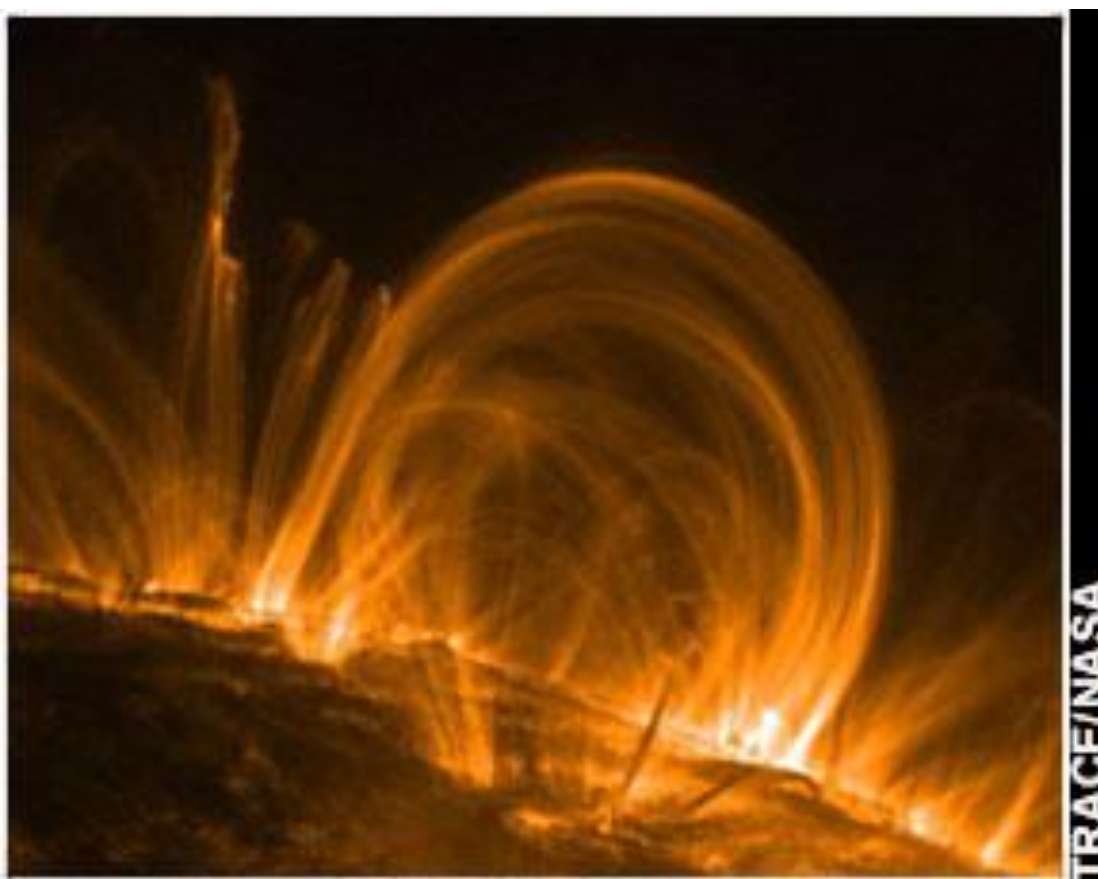


Fig. 2 - Arcos magnéticos de uma região ativa (AR) observados na cromosfera/corona.

FONTE: TRACE/NASA

Como é conhecido, a reconexão magnética que ocorre nas regiões ativas presentes na atmosfera solar causa a liberação da energia magnética armazenada com a consequente geração do “flare”. Este costuma ser classificado em uma de 5 classes numa escala logarítmica – em ordem crescente de intensidade: A, B, C, M ou X – dependendo de seu correspondente fluxo de raios-X (W/m^2) medido pelo detector do satélite GOES na banda 1 – 8 Å. Os fenômenos que causam os efeitos progressivamente mais duradouros são aqueles de moderada e grande intensidade, respectivamente das classes M e X, os quais correspondem respectivamente a fluxos de $(1,0-9,9) 10^{-5} \text{ W}/\text{m}^2$ e $> 10^{-4} \text{ W}/\text{m}^2$.

A energia liberada, durante os “flares”, se manifesta em aquecimento ou abrilhantamento do gás e energização ou aceleração de feixes de partículas. Essas partículas

interagem com determinadas partes dos arcos magnéticos gerando radiação eletromagnética de amplo espectro. Essa radiação, cerca de 8 minutos depois, atinge a Terra e causa efeitos, perturbações ou interrupções em serviços / sistemas tecnológicos terrestres. E, dependendo do caso, até riscos aos seres humanos. Logo, não existe tempo algum para ações preventivas ou que minimizem esses efeitos. Para que haja tempo suficiente para essas ações preventivas, há necessidade de prever a ocorrência desses fenômenos com antecedência suficiente (1-2 dias). Para isso, estamos trabalhando na criação de uma ferramenta auxiliar na previsão da ocorrência desses fenômenos, por meio do levantamento de dados históricos dos parâmetros e índices de atividade solar registrados desde o início do ciclo 23, a partir de 1996.

Na seção seguinte, apresentamos os resultados preliminares desse levantamento, obtidos junto às bases de dados de atividade solar desde o início deste trabalho, em Junho de 2023.

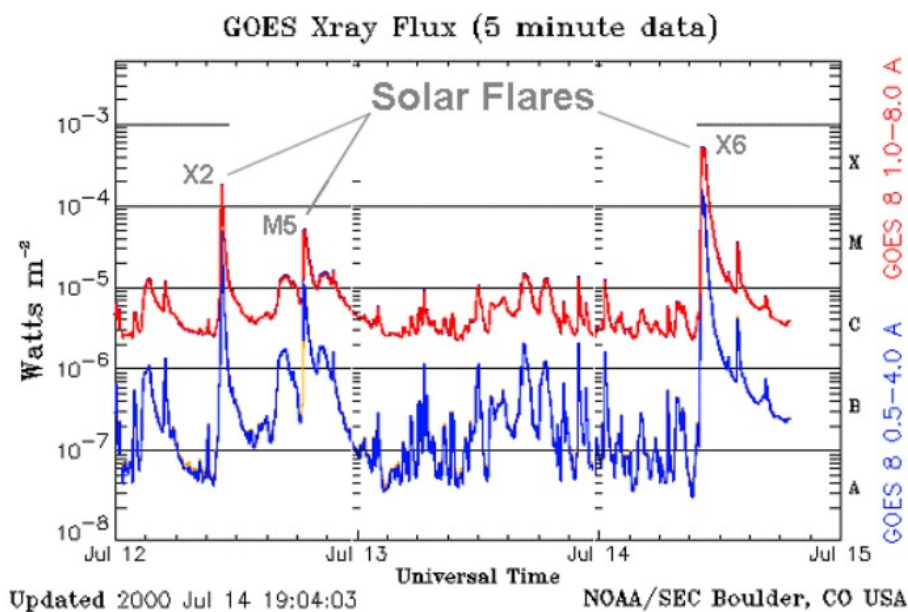


Fig. 3 - Classificação das explosões solares de raios-X ou "Solar Flare Alphabet Soup"

2. 1 Resultados preliminares

Para realização deste trabalho, iniciado em Junho de 2023, foi necessário pesquisar e fazer um levantamento dos dados, na base de dados da NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration, Centro de Ambiente Espacial. Foram analisados os dados de janeiro de 1996 a dezembro de 2000, eventos (“flares”) das classes M e X e fluxo dos níveis base de raios-X (GOES 1-8 Å) e rádio em 10.7cm. Apresentamos os resultados preliminares desse levantamento. Para o ciclo de atividade desse período do ciclo 23, foram registrados 39 “flares” classe X e 470 “flares” classe M. Os “flares” M e X são observados apenas para níveis base do fluxo integrado de raios-X (1-8 Å) de $1 \times 10^{-7} \text{ W/m}^2$ e $2 \times 10^{-7} \text{ W/m}^2$, respectivamente. Os mesmos eventos são observados apenas para níveis base da densidade de fluxo rádio (10.7cm) integrada de $85 \times 10^{-22} \text{ W.Hz}^{-1}.\text{m}^{-2}$ e $90 \times 10^{-22} \text{ W.Hz}^{-1}.\text{m}^{-2}$, respectivamente.

A partir da sequência do trabalho eventualmente devemos corrigir os valores apresentados acima que serão obtidos para todo o período do ciclo 23, desde 1996 até 2008.

3 . Conclusão

Durante o período de bolsa de Junho a Agosto de 2023, foi efetuado o levantamento de parâmetros e índices solares no site NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration, Centro de Ambiente Espacial. Para o período analisado de janeiro de 1996 a dezembro de 2000, foram obtidos resultados preliminares apresentados neste relatório. Será dada sequência ao levantamento dos dados, e as outras atividades do plano de iniciação científica, a partir da renovação da bolsa.

REFERÊNCIAS

CECATTO R. J. , Capítulo 4: O Sol, Maio de 2018, INPE.