

## Estudos das oscilações quase periódicas ocorrendo durante explosões solares intensas

### Studies of Quasi periodic pulsations occurring in intense solar flares

Otávio Oliveira Pacheco<sup>1</sup>, Jean Carlo Santos<sup>2</sup>

#### RESUMO

As explosões solares são definidas observacionalmente como um aumento abrupto da emissão em diferentes comprimentos de onda, o qual dura da ordem de minutos a horas. Elas são divididas em duas partes: uma fase impulsiva, com duração de alguns segundos, onde ocorre o aumento abrupto da emissão; e uma fase gradual, a qual dura de minutos a horas e onde a emissão retorna lentamente aos valores observados antes da explosão. Durante as explosões são observadas oscilações com períodos da ordem de frações de segundos a dezenas de minutos e duração média de 2 a 10 ciclos, as quais são chamadas de oscilações quase periódicas. As oscilações quase periódicas são geralmente analisadas utilizando métodos baseados na transformada de Fourier e análise de ondaletas. Esses métodos assumem que o sinal tem uma forma harmônica e funcionam bem para sinais oscilatórios de banda suficientemente estreita ou que pelo menos contenham um grande número de ciclos de oscilação. Neste trabalho iremos utilizar estes dois métodos na investigação das oscilações quase periódicas que ocorrem durante explosões solares, com o objetivo de contribuir para a sua caracterização e modelagem.

**PALAVRAS-CHAVE:** Sol; Explosões solares; Pulsações quase periódicas.

#### ABSTRACT

Solar flares are defined observationally as an increase of emission in different wavelengths, lasting minutes to hours. They are divided in two parts: impulsive phase, with duration of seconds, characterized by an abrupt increase in emission; and a gradual phase, with duration of minutes to hours and where emission returns slowly to values measured before the flare. Oscillations of periods in the order of fraction of seconds to a dozen minutes and average duration of 2 to 10 cycles are observed during flares, which are called quasi periodic oscillations. Quasi periodic oscillations are generally analyzed using methods based in Fourier transform and Wavelet analysis. These methods assume that the signal has a harmonic form and work well for oscillatory signals of sufficient narrow bands or at least that contain a large number of oscillation cycles. In this work we will use those methods in the investigation of quasi periodic oscillations that occur during solar flares, with the objective to contribute to its characterization and modeling.

**KEYWORDS:** Sun; Solar flares; quasi periodic pulsations;

#### INTRODUÇÃO

As explosões são definidas observacionalmente por um aumento da radiação eletromagnética em diferentes comprimentos de onda (Benz, 2017) e estão associadas a liberação da energia magnética através de um processo físico chamado de reconexão magnética (Yamada, 2010). O tempo de duração das explosões solares pode variar de acordo com a intensidade, indo de minutos a horas. As explosões são classificadas de acordo com o pico de energia emitido em raios X, na faixa de 1 a 8 angstrom, em: A, B, C, M ou X. As explosões da classe X são as mais intensas e estão associadas com um fluxo de  $10^{-4} \text{ Wm}^{-2}$ , enquanto a de classe M mais de  $10^{-5} \text{ Wm}^{-2}$  e o de classe C (a mais fraca)

<sup>1</sup> Bolsista voluntário. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil. E-mail: otaviopacheco@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 5245262111391682.

<sup>2</sup> Docente no Departamento Acadêmico de Física (DAFIS). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil. E-mail: jeansantos@utfpr.edu.br;. ID Lattes: 8321655302577819.

mais de  $10^{-6} \text{ Wm}^{-2}$ . As explosões solares podem ser divididas em duas fases, sendo elas: a fase impulsiva e a fase gradual. A fase impulsiva tem duração de segundos e nela ocorre um aumento abrupto da emissão. Já a fase gradual tem duração de minutos a horas, e nela a emissão retorna gradativamente aos valores observados antes da explosão.

Durante as explosões ocorrem variações quase periódicas na intensidade da emissão de radiação, conhecidas como Pulsações Quase Periódicas (QPPs - Quasi Periodics Pulsation). As QPPs (Nakariakov, 2009; Van Doorselaere, 2016; Kupriyanova, 2009) são observadas em diferentes fases das explosões e em diferentes comprimentos de onda, indo de ondas de rádio até raios gamma. O período das QPPs varia de frações de segundos até dezenas de minutos, e o tempo de duração é de alguns ciclos de oscilação. O mecanismo físico responsável pelas QPPs ainda não é conhecido.

As QPPs são geralmente analisadas utilizando métodos baseados na transformada de Fourier e análise de ondaletas. Esses métodos assumem que o sinal tem um forma harmônica e funcionam bem para sinais oscilatórios de banda suficientemente estreita ou que pelo menos contenham um grande número de ciclos de oscilação. Neste trabalho, utilizou-se destes dois métodos na investigação das QPPs que ocorrem durante explosões solares.

## METODOLOGIA

Neste trabalho foram utilizados os dados obtidos pelo instrumento XRS (Solar X-Ray Sensor) a bordo do satélite GOES-15 (Geostationary Operational Environmental Satellite). Em cada satélite GOES existem dois sensores de raios X os quais fornecem fluxos de raios X para duas bandas de comprimento de onda: 0.5-4 angstrom (canal curto) e 1-8 angstrom (canal longo). O instrumento obtém medidas de fluxo com uma resolução temporal de 2.048 segundos em ambos os canais. O instrumento também disponibiliza médias de 1 minuto construídas a partir dos dados brutos, e médias de 5 minutos construídas a partir desses dados. Durante explosões solares intensas os canais do instrumento XRS podem saturar a  $0.00116 \text{ Wm}^{-2}$  para o canal longo ou  $0.00012 \text{ Wm}^{-2}$  para o canal curto.

Neste trabalho utilizou-se a linguagem de programação Python como ferramenta para visualização e análise dos dados. A escolha desta linguagem baseou-se no fato dela ser gratuita, de código aberto, fácil de utilizar, e por possuir diversos pacotes que auxiliam na realização da análise científica de dados. Para identificar o início, pico e o fim das explosões solares nos dados de raios X, utilizou-se um método descrito em Aschwanden (2012) na construção de um algoritmo em Python. O método aplica os seguintes passos:

1. Reamostragem dos dados de 2.0048 s para 12 s.
2. Definição do tempo mínimo de 60 s para a duração de uma explosão
3. Suavização dos dados de raios X re-amostrados usando uma média corrida com janela de 31 pontos de amostragem
4. Detecção dos máximos locais
5. Detecção dos eventos de explosão, os quais estão associados com máximos locais com fluxo maior que  $10^{-6} \text{ Wm}^{-2}$ .
6. Detecção do início da explosão partindo do pico através da análise regressiva do fluxo medido em cinco pontos distintos, até que o gradiente não seja mais positivo.

7. Detecção do fim da explosão partindo do pico através da análise progressiva do fluxo medido em um ponto, até que o valor de fluxo seja menor que o valor do fluxo medido no início da explosão.
8. Determinação da duração do evento através da diferença entre os tempos associados ao fim e início da explosão.

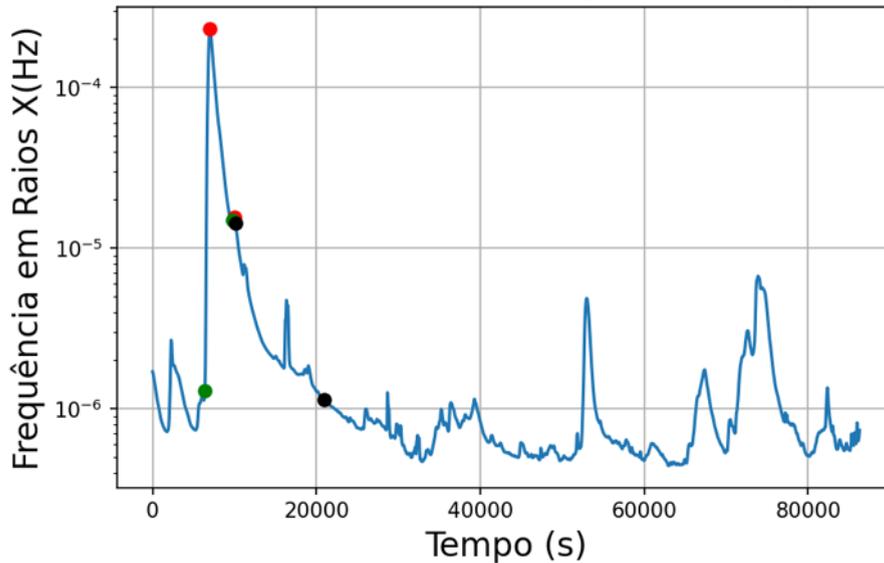
Uma vez identificado o evento de explosão, selecionou-se os dados de raios X num intervalo iniciando uma hora antes do início da explosão e uma hora após o término da explosão.

As QPPs são geralmente analisadas utilizando métodos baseados na transformada de Fourier e análise de ondaletas. Esses métodos assumem que o sinal tem um forma harmônica e funcionam bem para sinais oscilatórios de banda suficientemente estreita ou que pelo menos contenham um grande número de ciclos de oscilação. A transformada de Fourier é uma transformada integral que expressa uma função em termos de funções de base sinusoidal, decompondo um sinal temporal em frequências. Este método indica de forma confiável apenas sinais com períodos constantes ou com uma baixa variação ao longo de um intervalo determinado. A partir da transformada de Fourier é possível obter o espectro de potência do sinal, o qual descreve a distribuição de potência nas diferentes frequências que compõem o sinal. O espectro de potência é utilizado para identificar componentes periódicas presentes no sinal cujo pico apresenta significância estatística, isto é, cuja potência é maior que a potência do ruído de fundo. Outro método utilizado na identificação das componentes periódicas presentes no sinal é a análise de ondaletas (wavelet). A análise de ondaletas é capaz de decompor um sinal originalmente descrito no domínio do tempo em um sinal no domínio das frequências e do tempo. Entretanto, diferente da análise de Fourier, a qual pode extrair informações das frequências presentes no sinal, mas não pode identificar quando no tempo essas frequências aparecem, a análise de ondaletas extrai informações no domínio do tempo e diz quando determinada frequência aparece, ou seja, é um operador local.

## RESULTADO

O algoritmo de identificação acima descrito foi aplicado aos dados de raios X obtidos pelo satélite GOES no dia 15 de fevereiro de 2001 (ver figura 1) para identificar a presença de explosões solares do tipo M e X. Neste período foi identificada a ocorrência de uma explosão do tipo X com início às 01:46:25 UT (verde), pico às 01:56:39 UT (vermelho) e fim às 05:50:07 UT (preto). A fase impulsiva do evento durou cerca de 10 minutos, enquanto a fase gradual durou aproximadamente 4 horas. Durante a fase gradual ocorreu um segundo pico que foi descartado como estando associado a uma explosão pois seu tempo de duração não satisfaz ao item 2 dos critérios de seleção.

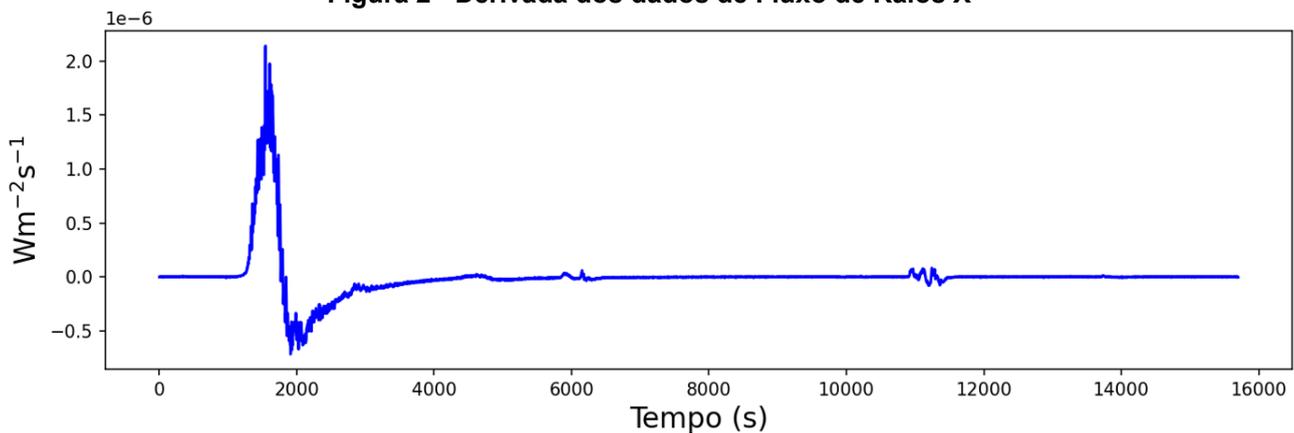
Figura 1 - Emissão de Raios X em função do tempo durante a explosão solar



Fonte: De autoria própria

Para a investigação da ocorrência das QPPs utilizou-se a primeira diferença ao invés dos dados originais a fim de remover a tendência presente neste. A figura 2 mostra a primeira diferença calculada a partir da derivada temporal do sinal original. Nos dados da primeira diferença, a fase impulsiva da explosão aparece como um pulso positivo, enquanto que a fase gradual aparece como um pulso negativo. Nos dados da primeira diferença também fica evidente a presença de oscilações de alta frequência durante o período de ocorrência da explosão.

Figura 2 - Derivada dos dados de Fluxo de Raios X

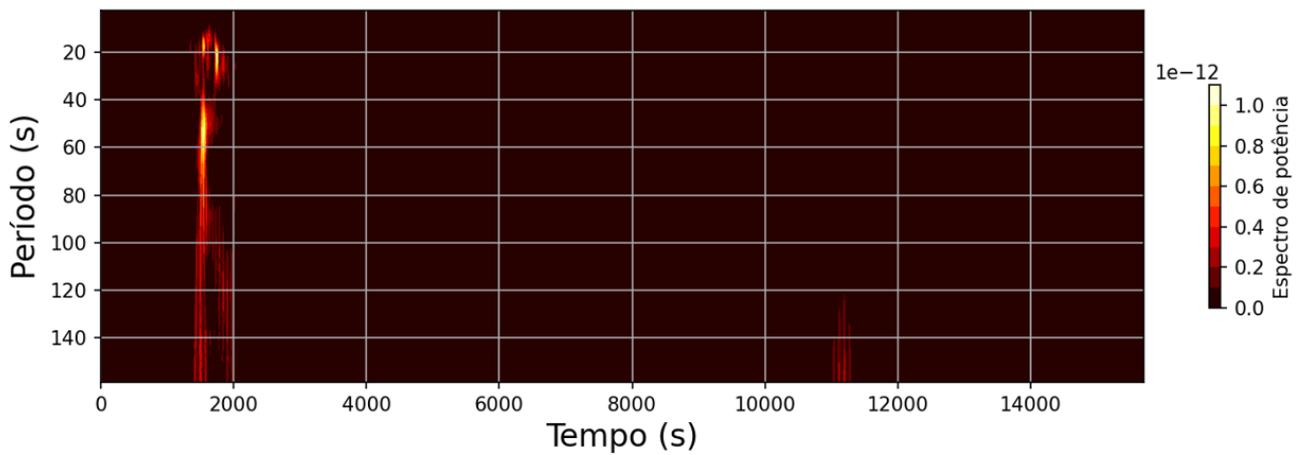


Fonte: De autoria própria

Para investigar as características das oscilações de alta frequência presentes no sinal utilizou-se o espectro de Potência, obtido a partir da transformada de Fourier, e o periodograma, obtido a partir da transformada ondataleta do sinal. O espectro de potência permite identificar as frequências (períodos) principais que compõem o sinal, e onde está a maior parte da energia. Já o periodograma, além de identificar as frequências principais, apresenta a informação temporal e indica em quais instantes essas frequências aparecem no sinal.

O periodograma (Figura 3) obtido a partir da análise de ondaletas da primeira diferença, indica a presença de oscilações com períodos em torno de 20 e 60 segundos ocorrendo no fim da fase impulsiva e início da fase gradual. O tempo de duração dessas oscilações é de alguns ciclos, estando presente no sinal por aproximadamente dez minutos. A partir do periodograma é possível verificar que estas oscilações aparecem apenas em torno do horário de pico da explosão, não aparecendo em nenhuma outra fase da explosão.

Figura 3 - Transformada Ondaleta do Sinal (Periodograma)



Fonte: De autoria própria

## CONCLUSÕES

As explosões solares estão entre os fenômenos mais energéticos ocorrendo na atmosfera do Sol. Sua compreensão e modelagem são muito importantes para a física solar. Atualmente, o modelo utilizado na descrição das explosões solares a partir das observações é o modelo padrão das explosões. Oscilações quase periódicas são observadas em quase todas as explosões, principalmente nas explosões mais energéticas de classe M e X. Entretanto, o modelo padrão não inclui a presença das oscilações quase periódicas.

Neste trabalho desenvolveu-se um algoritmo para identificar automaticamente a presença de explosões solares do tipo M e X. O algoritmo identifica os horários de início, pico e fim da explosão. A partir desta identificação é possível extrair os dados de raios X do período da explosão para identificação e análise da ocorrência de oscilações quase periódicas. Para uma explosão solar de Classe X ocorrida no dia 15 de fevereiro de 2011 identificamos a ocorrência de oscilações quase periódicas, com períodos em torno de 20 e 60 segundos, ocorrendo no fim da fase impulsiva e início da fase gradual. Durante este evento as oscilações quase periódicas permaneceram por um intervalo de mais ou menos 10 minutos em torno do horário de pico da explosão.

Utilizando-se os algoritmos desenvolvidos neste trabalho pretende-se estender a investigação das oscilações quase periódicas para outros eventos de explosão. Também pretende-se aplicar o método para analisar outros comprimentos de onda na faixa do ultravioleta e extremo ultravioleta, além dos dados de raios X.

### Disponibilidade de código

O código desenvolvido utiliza a linguagem python e pacotes para ela desenvolvidos. Quem tiver interesse entrar em contato via email com: [otaviopacheco@alunos.utfpr.edu.br](mailto:otaviopacheco@alunos.utfpr.edu.br)

### Conflito de interesse

Os dados disponibilizados são abertos, não havendo portanto conflito de interesses.

### Agradecimentos

Agradeço a UTFPR e ao meu orientador pela oportunidade de realizar a iniciação científica. Também agradeço ao meu pai, que sempre me incentivou nos estudos.

### REFERÊNCIAS

ASCHWANDEN, Markus J.; FREELAND, Samuel L. Automated solar flare statistics in soft X-rays over 37 years of GOES observations: The invariance of self-organized criticality during three solar cycles. **The Astrophysical Journal**, v. 754, n. 2, p. 112, 2012.

BENZ, Arnold O. Flare observations. **Living reviews in solar physics**, v. 14, p. 1-59, 2017.

FLETCHER, Lyndsay et al. An observational overview of solar flares. **Space science reviews**, v. 159, p. 19-106, 2011.

KUPRIYANOVA, E. G. et al. Quasi-periodic pulsations in solar and stellar flares. Review. **Solar-Terrestrial Physics**, v. 6, n. 1, p. 3-23, 2020.

PRIEST, Eric. **Magnetohydrodynamics of the Sun**. Cambridge University Press, 2014.

SANTOS, Tallyta Layanne de Almeida et al. **Características das emissões na faixa do extremo ultravioleta (EUV) durante uma explosão solar classe X8. 2 ocorrida no limbo solar**. 2021. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

VAN DOORSSELAERE, Tom; KUPRIYANOVA, Elena G.; YUAN, Ding. Quasi-periodic pulsations in solar and stellar flares: an overview of recent results (invited review). **Solar Physics**, v. 291, p. 3143-3164, 2016.

YAMADA, Masaaki; KULSRUD, Russell; JI, Hantao. Magnetic reconnection. **Reviews of modern physics**, v. 82, n. 1, p. 603, 2010.

MORETTIN, Pedro Alberto. **Ondas e ondaletas: da análise de Fourier à análise de ondaletas de séries temporais**. São Paulo: EDUSP. Acesso em: 24 out. 2023. , 2014.