Universidade do Vale do Paraíba Instituto de Pesquisa & Desenvolvimento Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia

MARCO ANTÔNIO DE ULHÔA CINTRA

# COMPARAÇÃO ENTRE TEMPESTADES DE RUÍDO SOLARES TIPO I E PADRÕES DE FLUTUAÇÕES CANÔNICAS VIA ANÁLISE DE ESPECTRO GRADIENTE

São José dos Campos, SP

# COMPARAÇÃO ENTRE TEMPESTADES DE RUÍDO SOLARES TIPO I E PADRÕES DE FLUTUAÇÕES CANÔNICAS VIA ANÁLISE DE ESPECTRO GRADIENTE

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia, como complementação dos créditos necessários para obtenção do grau de Mestre em Física e Astronomia.

Orientador: Prof<sup>o</sup> Dr. Francisco Carlos Rocha Fernandes

Coorientador: Profº Dr. Reinaldo Roberto Rosa





## TERMO DE AUTORIZAÇÃO DE DIVULGAÇÃO DA OBRA

## Ficha catalográfica

Cintra, Marco Antônio de Ulhôa Comparação entre Tempestades de Ruído Solares Tipo Padrões de Flutuações Canônicas via Análise de Espectro Grad / Marco Antônio de Ulhôa Cintra; orientador, Francisco Ca Rocha Fernandes; co-orientador Reinaldo Roberto Rosa José dos Campos, SP, 2018. 1 CD-ROM, 114 p.	I e iente arlos São
Dissertação (Mestrado Acadêmico) - Universidade do Val Paraíba, São José dos Campos. Programa de Pós-Graduação em F e Astronomia.	e do Ísica
Inclui referências	
<ol> <li>Física e Astronomia. 2. Radioemissões Solares Tempestades de Ruído. 4. Séries Temporais. 5. Análise de Pac Gradiente. I. Fernandes, Francisco Carlos Rocha , orient. Rosa, Reinaldo Roberto , co-orient. III. Universidade do Val Paraíba. Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia. Título.</li> </ol>	. 3. lrões II. Le do IV.

Eu, Marco Antônio de Ulhôa Cintra, autor(a) da obra acima referenciada:

Autorizo a divulgação total ou parcial da obra impressa, digital ou fixada em outro tipo de mídia, bem como, a sua reprodução total ou parcial, devendo o usuário da reprodução atribuir os créditos ao autor da obra, citando a fonte.

Declaro, para todos os fins e efeitos de direito, que o Trabalho foi elaborado respeitando os princípios da moral e da ética e não violou qualquer direito de propriedade intelectual sob pena de responder civil, criminal, ética e profissionalmente por meus atos.

São José dos Campos, 31 de Outubro de 2018.

Autor(a) da Obra





Data da defesa: \_\_\_\_\_/\_\_\_/





## MARCO ANTÔNIO DE ULHÔA CINTRA

# "COMPARAÇÃO ENTRE TEMPESTADES DE RUÍDO SOLARES TIPO I E PADRÕES DE FLUTUAÇÕES CANÔNICAS VIA ANÁLISE DE ESPECTRO GRADIENTE."

Dissertação aprovada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre, do Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia, do Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento da Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, SP, pela seguinte banca examinadora:

PROF. DR. ARIAN OJEDA GONZÁLEZ
PROF. DR. FRANCISCO CARLOS ROCHA FERNENDES
PROF. DR. REINALDO ROBERTO ROSA - INPE-
PROF. DR. VALDIR GIL PILLAT
PROF. DR. MAURICIO JOSÉ ALVES BOLZAM - UFG
PROF. DR. MURILO DA SILVA DANTAS – IFSP

Prof. Dr. Leandro José Raniero Diretor do IP&D – Univap São José dos Campos, 31 de Agosto de 2018.

۰.

Av. Shishima Hifumi, 2911 - 12244-000 São José dos Campos – SP www.univap.br

Dedico este trabalho à minha mãe.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus orientadores Prof. Dr. Francisco Carlos Rocha Fernandes (UNIVAP) e Prof. Dr. Reinaldo Roberto Rosa (INPE), pelos ensinamentos, orientação e paciência, sem os quais não teríamos atingido este objetivo.

À minha mãe, pelo apoio desde sempre, em todos os momentos.

Ao Instituto Federal de São Paulo (IFSP) Câmpus Caraguatatuba pela concessão do Horário Especial de Estudante, principalmente aos Professores:

- Me. Nelson Alves Pinto (ex Diretor Geral);
- Ma. Tânia Cristina Lemes Soares Pontes (atual Diretora Geral).

Aos colegas de trabalho da Coordenadoria de Tecnologia da Informação (CTI), do IFSP Câmpus Caraguatatuba, pela compreensão e auxílios durante minhas ausências no cumprimento do Horário Especial de Estudante:

- Hugo Salles Cuba;
- Leandro Oliveira da Silva;
- Luiz Gustavo Nicola Mendes;
- Mateus Santos Santana;
- Thyago Nicollas dos Santos Lima.

Ao IP&D - UNIVAP, principalmente ao Diretor Prof. Dr. Leandro José Raniero.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de Mestrado.

À Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia (PPGFA) da UNIVAP, em especial aos Coordenadores Prof. Dr. Oli Luiz Dors Junior e Prof. Dr. Arian Ojeda González, por todo apoio.

Aos membros da Banca do Exame de Qualificação, Prof. Dr. Arian Ojeda González, Prof. Dr. Valdir Gil Pillat e Profa. Dr.a Virgínia Klausner de Oliveira pelas valiosas contribuições e sugestões ao trabalho e ao texto. Aos membros da Banca da Defesa, Prof. Dr. Arian Ojeda González, Prof. Dr. Valdir Gil Pillat, Profa. Dr.a Virginia Klausner de Oliveira, Prof. Dr. Maurício José Alves Bolzam e Prof. Dr. Murilo Da Silva Dantas.

Aos Professores do PPGFA que me deram aula, pelos magníficos conhecimentos passados:

- Prof. Dr. Alexandre Soares de Oliveira;
- Prof. Dr. Francisco Carlos Rocha Fernandes;
- Prof. Dr. Sérgio Pilling Guapyassú de Oliveira;
- Prof. Dr. Valdir Gil Pillat.

Ao Prof. Dr. Alan Prestes - Coordenador do Núcleo de Estudos do Ciclo Básico da FEAU-UNIVAP e à FEAU por terem me selecionado para realizar Estágio Docência na FEAU-UNIVAP.

Ao Prof. Dr. Carlos Henrique Netto Lahoz (UNIVAP/IAE-CTA), Prof. responsável pelo meu Estágio Docência na disciplina Lógica para Programação, ministrada na FEAU-UNIVAP.

À Secretaria Acadêmica do IP&D - UNIVAP, principalmente à Secretária Miriam Aparecida Alves Mosquim Nunes.

À Secretaria Acadêmica "Tudo Aqui" - UNIVAP, principalmente à Secretária Diva Maris Borelli.

- À Secretaria Acadêmica da FEAU UNIVAP.
- À Biblioteca do IP&D UNIVAP.
- À Biblioteca Central UNIVAP.
- À Biblioteca da FEAU UNIVAP.

À Assessoria de Imprensa da FVE-UNIVAP, principalmente ao Rafael Freias, pelo apoio dado na organização do VI SimFAST - Simpósio de Física e Astronomia do Vale do Paraíba.

Ao Laboratório Associado de Computação e Matemática Aplicada (LAC) - INPE.

À Biblioteca do INPE.

Ao Me. Rubens Andreas Sautter (CAP-INPE), pelas orientações quanto ao uso do *software* GPA, também pela sua manutenção e desenvolvimento, bem como pela divulgação no repositório GitHub.

Ao Me. Paulo Henrique Barchi (CAP-INPE), pelas orientações quanto ao uso do *software* GPA, e pela concessão de séries temporais canônicas.

Ao Prof. Dr. Christian Andreas Monstein, do Departamento de Física da ETH Zürich (Suíça), Investigador Principal (PI) da Rede Mundial e-CALLISTO de Rádio Espectrômetros, pela manutenção e disponibilização desta Rede, e pelo auxílio com *softwares* para manipulação de dados envolvendo dados desta Rede.

A todos os colegas discentes ou ex-discentes do PPGFA, entre mestres/mestrandos, doutores/doutorandos, principalmente:

- Adriana Ribeiro da Silva, principalmente pelos auxílios em disciplinas do curso;
- Adriano Francisco Monteiro dos Santos, principalmente pelos auxílios em disciplinas do curso;
- Alberto Alves de Mesquita, principalmente pelas compreensões enquanto representante discente do PPGFA;
- Celso Benedito de Oliveira Junior, principalmente pelos auxílios em disciplinas do curso;
- Fábio Cavassam Grego, principalmente pelos auxílios em disciplinas do curso;
- Fatima Maria Broca, principalmente pelos auxílios em disciplinas do curso;
- Fredson Conceição dos Santos, principalmente pelo apoio durante o COLAGE XI, e auxílios em disciplinas do curso;
- Luiz Eduardo Camargo Aranha Schiavo, principalmente pelo auxílio inicial na utilização do modelo da ABNT do LaTeX (abnTeX);
- Marina Gomes Rachid, principalmente pelos auxílios em disciplinas do curso, e conversas sobre Astrobiologia;

- Nathanne Cristina Vilela Rost, principalmente pelos auxílios em disciplinas do curso;
- Pamela Rita Pereira Meibach Rosa, principalmente pelos auxílios em disciplinas do curso;
- Rosemeire Aparecida Rosa, principalmente pelos auxílios em disciplinas do curso;
- Thays Pontes Bentes, principalmente pelos auxílios em disciplinas do curso, e conversas sobre Astrobiologia;
- Victor De Souza Bonfim, principalmente pelos auxílios em disciplinas do curso, e conversas sobre Astrobiologia;
- Zuleika Auxiliadora da Luz Sodré, principalmente pelo auxílio na seleção de séries temporais de explosões solares tipo I, do e-CALLISTO.

It is unworthy of excellent men to lose hours like slaves in the labour of calculation which could safely be relegated to anyone else if machines were used.

Gottfried Wilhelm Leibniz

(Describing, in 1685, the value to astronomers of the hand-cranked calculating machine he had invented in 1673.)

## RESUMO

Sabe-se que emissões solares Tipo I são geradas por elétrons não térmicos acelerados por variações estocásticas na configuração magnética das regiões ativas. A maioria das explosões Tipo I é registrada como uma sequência de emissões individuais caracterizando as tempestades de ruído, que também podem ser associadas com a ocorrência de *flares* solares. Neste caso, a energia dissipativa é adicionada à liberação de energia por pequenas mudanças na distribuição magnética, que contribuem para a manutenção de tempestades de ruído duradouras. No entanto, devido à maior resolução espectral e sensibilidade observacional, detalhes sobre os mecanismos de emissão e duração de explosões do Tipo I precisam ser melhor compreendidos. Neste trabalho, utilizando a técnica espectral baseada no Gradient Pattern Analysis (GPA), analisou-se tempestades de ruído (medidas na forma de séries temporais em comprimentos de onda métricos (263,3 MHz) geradas pelo espectrógrafo suíço BLEN7M e armazenadas no repositório da rede e-CALLISTO (Compound Astronomical Low cost Low frequency Instrument for Spectroscopy and Transportable Observatory). Para fins de caracterizar os padrões de flutuação das explosões solares do Tipo I a análise espectral foi aplicada a séries temporais com diferentes padrões de flutuação considerados canônicos: ruídos  $1/f^{\beta}$  (White Noise, Pink Noise e Red Noise), caóticas e turbulentas. De acordo com a técnica do espectro gradiente, as séries temporais foram divididas em 11 escalas (iniciando em 3600 pontos) a fim de resultar em espectros com escalas de correlação compatíveis. Como técnicas complementares foram calculados também, para cada série temporal, os espectros de potência via Power Spectral Density (PSD) e Detrended Fluctuation Analysis (DFA). Os resultados indicam que os espectros gradiente de tempestades de ruído solares Tipo I são, no domínio da frequência, incompatíveis com os padrões canônicos das séries temporais de ruídos  $1/f^{\beta}$ , entretanto apresentam compatibilidade espectral com os dados gerados a partir do padrão turbulento. Portanto, com base na análise espectral apresentada, processos turbulentos específicos, como já previsto na literatura, podem estar relacionados à dinâmica de plasma subjacente responsável pelas emissões solares do Tipo I aqui estudadas. Com base nessa aplicação, discute-se ainda quais as vantagens da técnica GPA sobre as metodologias mais usuais como PSD e DFA.

**Palavras-chave**: Radioemissões Solares. Tempestades de Ruído. Séries Temporais. Análise de Padrões Gradiente. Processos Estocásticos.

## ABSTRACT

It is known that Type I solar emissions are generated by non-thermal electrons accelerated by stochastic variations in the magnetic configuration of the active regions. Most Type I bursts are recorded as a sequence of individual emissions characterizing noise storms, which can also be associated with the occurrence of solar flares. In this case, the dissipative energy is added to the energy release by small changes in the magnetic distribution, which contribute to the maintenance of lasting noise storms. However, due to the higher spectral resolution and observational sensitivity, details about the emission and duration mechanisms need to be better understood. In this work, using the spectral technique based in Gradient Pattern Analysis (GPA), we analyzed noise storms (measured as time series in metric wavelengths (263.3 MHz) generated by the Swiss spectrograph BLEN7M and stored in the e-CALLISTO (Compound Astronomical Low cost Instrument for Spectroscopy and Transportable Observatory) network repository. In order to characterize the fluctuation pattern of Type I solar bursts, the spectral analysis was applied to time series with different fluctuation patterns considered canonical: noise  $1/f^{\beta}$  (White Noise, Pink Noise and Red Noise), chaotic and turbulent. According to the gradient spectrum technique, the time series were divided into 11 scales (starting at 3600 points) in order to result in spectra with compatible scaling correlation. For each time series, the power spectra were also calculated by Power Spectral Density (PSD) and Detrended Fluctuation Analysis (DFA). The results indicate that the gradient spectra of Type I solar noise storms are, in the frequency domain, incompatible with  $1/f^{\beta}$  noise patterns, but they do have spectral compatibility with the data generated from the turbulent pattern. Therefore, based on the spectral analysis presented, specific turbulent patterns, as already predicted in the literature, may be related to the underlying process associated with the plasma dynamics responsible for the Type I solar storms studied here. Based on this application, we discussed the advantages of the GPA technique over the most common methodologies such as PSD and DFA.

**Keywords**: Solar Radio Emissions. Noise Storms. Time Series. Gradient Pattern Analysis. Stochastic Processes.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 $$ –	Imagem no ultravioleta extremo de arcos magnéticos coronais, obtida	
	pelo satélite TRACE (Transition Region And Coronal Explorer)	30
Figura 2 $-$	Representação esquemática simplificada de um arco magnético e da	
	região de reconexão magnética e liberação de energia durante um $\mathit{flare}$	
	solar	32
Figura 3 $-$	Espectro dinâmico esquemático de radioemissões solares observadas no	
	intervalo de radiofrequências (10 - 3000 MHz) durante e após um $flare$	
	solar intenso.	35
Figura 4 –	Espectro dinâmico do fragmento de uma tempestade de ruído, mostrando	
	cadeia de emissões Tipo I registradas pelo espectrógrafo BLEN7M da	
	rede e-CALLISTO, em 30 de julho de 2011 (~ 07:45 - 08:00 UTC)	37
Figura 5 $$ –	Séries de ruídos 1/f e seus espectros correspondentes	43
Figura 6 $-$	Metodologia para mapear a série temporal de tamanho N em uma	
	matriz quadrada de ordem $\sqrt{N}\times \sqrt{N}.$ Neste exemplo temos uma série	
	temporal de 1024 pontos distribuídos em uma matriz	47
Figura 7 $-$	Três exemplos de perfis de amplitudes compostas de 100 pontos, e seus	
	respectivos padrões-gradientes, calculados a partir de matrizes $10\times 10.$	48
Figura 8 –	Diagrama explicativo referente à obtenção do Espectro Gradiente	61
Figura 9 –	Gráficos Log 1/L × $G_2$ . Análise via GPA de 9 séries temporais (1 série	
	de emissão solar Tipo I em cada gráfico $+$ 8 séries de ruídos canônicos	
	em cada gráfico), para escalas de L1 a L11	64
Figura 10 –	Gráficos Log 1/L × $G_2$ . Análise via GPA de 9 séries temporais (1 série	
	de emissão solar Tipo I em cada gráfico $+$ 8 séries de ruídos canônicos	
	em cada gráfico), para escalas de L1 a L11	65
Figura 11 –	Gráfico Log 1/L × $G_2$ . Análise via GPA de 4 séries temporais (1 série de	
	emissão solar Tipo I + 3 séries de ruídos canônicos), com fitagem MMQ	
	das partes positivas (L1 a L8) e negativas (L8 a L11), para escalas de	
	L1 a L11	67
Figura 12 –	Gráfico Log 1/L × $G_2$ . Análise via GPA das séries "A6_Logist",	
	"A7_Henon _x", "White Noise" e "Pink Noise"	67

Figura 13 –	- Gráfico Log $1/L \times G_2$ . Análise via GPA das séries "Red Noise" e "A0_Turb6mil"	68
Figura 14 –	Gráfico Log $1/L \times G_2$ . Análise via GPA das 8 séries de tempesta- des de ruído solares e das séries canônicas "A5_Chua-Chaos_Y1" e "A8_PModel".	69
Figura 15 –	- Gráficos do processamento DFA das 8 séries temporais de emissões solares Tipo I	72
Figura 16 –	- Gráficos do processamento DFA das 8 séries temporais canônicas	73
Figura 17 –	- Gráficos do processamento PSD das 8 séries temporais de emissões solares Tipo I	74
Figura 18 –	- Gráficos do processamento PSD das 8 séries temporais canônicas	75
Figura 19 –	- Espectro dinâmico do fragmento (05:45 - 06:00 UTC) da tempestade de ruído registrada em 30 de julho de 2011, pelo Espectrógrafo BLEN7M	
	(arquivo FITS "BLEN7M_20110730_054503_25")	97
Figura 20 –	- Série temporal em 263,3 MHz da tempestade de ruído registrada em 30 de julho de 2011 (05:45 - 06:00 UTC), com 3600 pontos.	97
Figura 21 –	- Espectro dinâmico do fragmento (06:00 - 06:15 UTC) da tempestade de ruído registrada em 30 de julho de 2011, pelo Espectrógrafo BLEN7M	
	(arquivo FITS "BLEN7M_20110730_060002_25")	98
Figura 22 –	- Série temporal em 263,3 MHz da tempestade de ruído registrada em 30 de julho de 2011 (06:00 - 06:15 UTC), com 3600 pontos	98
Figura 23 –	- Espectro dinâmico do fragmento (06:15 - 06:30 UTC) da tempestade de ruído registrada em 30 de julho de 2011, pelo Espectrógrafo BLEN7M (arquivo FITS "BLEN7M 20110730 061502 25")	99
Figura 24 –	- Série temporal em 263,3 MHz da tempestade de ruído registrada em 30 de julho de 2011 (06:15 - 06:30 UTC), com 3600 pontos.	99
Figura 25 –	<ul> <li>Espectro dinâmico do fragmento (06:30 - 06:45 UT) da tempestade de ruído registrada em 30 de julho de 2011, pelo Espectrógrafo BLEN7M (arquivo EUTS "PLEN7M 20110720 062002 25")</li> </ul>	100
Figura 26 –	- Série temporal em 263,3 MHz da tempestade de ruído registrada em 30 de julho de 2011 (06:30 - 06:45 UTC), com 3600 pontos	100
	ac Jame ac 2011 (00.00 00.10 010), com 5000 pomos	100

Figura 27 –	Espectro dinâmico do fragmento (06:45 - 07:00 UTC) da tempestade de
	ruído registrada em 30 de julho de 2011, pelo Espectrógrafo BLEN7M
	(arquivo FITS "BLEN7M_20110730_064502_25")
Figura 28 –	Série temporal em 263,3 MHz da tempestade de ruído registrada em 30
	de julho de 2011 (06:45 - 07:00 UTC), com 3600 pontos
Figura 29 –	Espectro dinâmico do fragmento (10:00 - 10:15 UTC) da tempestade de
	ruído registrada em 30 de julho de 2011, pelo Espectrógrafo BLEN7M
	(arquivo FITS "BLEN7M_20110730_100002_25")
Figura 30 –	Série temporal em 263,3 MHz da tempestade de ruído registrada em 30
	de julho de 2011 (10:00 - 10:15 UTC), com 3600 pontos 102
Figura 31 –	Espectro dinâmico do fragmento (11:00 - 11:15 UTC) da tempestade de
	ruído registrada em 30 de julho de 2011, pelo Espectrógrafo BLEN7M
	(arquivo FITS "BLEN7M_20110730_110003_25")
Figura 32 –	Série temporal em 263,3 MHz da tempestade de ruído registrada em 30
	de julho de 2011 (11:00 - 11:15 UTC), com 3600 pontos 103
Figura 33 –	Espectro dinâmico do fragmento (11:45 - 12:00 UTC) da tempestade de
	ruído registrada em 30 de julho de 2011, pelo Espectrógrafo BLEN7M
	(arquivo FITS "BLEN7M_20110730_114500_25")
Figura 34 –	Série temporal em 263,3 MHz da tempestade de ruído registrada em 30
	de julho de 2011 (11:45 - 12:00 UTC), com 3600 pontos
Figura 35 –	Série temporal "White Noise", com 3600 pontos. Escala da Posição em
	$10^3$
Figura 36 –	Série temporal "Pink Noise", com 3600 pontos. Escala da Posição em 10 <sup>3</sup> .105
Figura 37 –	Série temporal "Red Noise", com 3600 pontos. Escala da Posição em $10^3.105$
Figura 38 –	Série temporal "A0_Turb6mil", com 3600 pontos. Escala da Posição
	em $10^3$
Figura 39 –	Série temporal "A5_Chua-Chaos_Y1", com 3600 pontos. Escala da
	Posição em $10^3$
Figura 40 –	Série temporal "A6_Logist", com 3600 pontos. Escala da Posição em 10 <sup>3</sup> .106
Figura 41 –	Série temporal "A7_Henon _x", com 3600 pontos. Escala da Posição
	$em 10^3$

Figura 42 –	Série temporal "A8_PModel", com 3600 pontos. Escala da Posição em	
	$10^3$ .	107
Figura 43 –	Exemplo de espectro de potências de uma série temporal. Obtenção	
	do espectro de potências para uma série temporal com $2^{17}$ medidas	
	utilizando a Transformada Rápida de Fourier.	111
Figura 44 –	Gráfico da série temporal - Tempo $\times$ Amplitude - de uma radio emissão	
	solar Tipo I, com 2048 pontos	112
Figura 45 –	Gráfico do PSD - Frequência (Hz) $\times$ Potência - de uma série temporal	
	de radioemissão solar Tipo I, com 2048 pontos	112
Figura 46 –	Gráfico da série temporal - Tempo $\times$ Amplitude - de uma radio emissão	
	solar Tipo I, com 2048 pontos	116
Figura 47 –	Gráfico do DFA - $log_{10}(s) \times log_{10}F(s)$ - de uma série temporal de	
	radioemissão solar Tipo I, com 2048 pontos.	116

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Classificação de <i>flares</i> solares baseada em emissão raio X	32
Tabela 2 –	Séries temporais de emissões solares Tipo I selecionadas para as análises	
	via GPA, PSD e DFA	54
Tabela 3 –	Séries temporais canônicas selecionadas para as análises via GPA, PSD	
	e DFA	55
Tabela 4 –	Resultados do Processamento do ${\cal G}_2$ (Segundo Momento Gradiente) das	
	8séries temporais de emissões solares Tipo I e das $8$ séries temporais	
	canônicas	66
Tabela 5 –	Resultados do Processamento do PSD e DFA das 8 séries temporais de	
	emissões solares Tipo I e das 8 séries temporais canônicas	76
Tabela 6 –	Valores do expoente de escala $\alpha$ e suas implicações fenomenológicas	115

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	27
1.1	Objetivo	28
2	REVISÃO DA LITERATURA	29
2.1	Emissões Solares	29
2.1.1	O Campo Magnético na atividade solar	30
2.1.2	Flares Solares	31
2.1.3	Explosões Solares em Rádio	33
2.1.4	Explosões Tipo I e Tempestades de Ruído	36
2.2	Padrões de Flutuação e Leis de Potência em Séries Temporais	39
2.3	Análise de Padrões Gradiente (GPA)	44
2.3.1	Cálculo do Segundo Momento Gradiente $(G_2)$ a partir de uma Matriz $\ .$ .	44
2.3.2	O Segundo Momento Gradiente $(G_2)$	45
2.3.3	Análise de Padrões-Gradiente (GPA) para Séries Temporais	47
2.3.4	Cálculo do Segundo Momento Gradiente $(G_2)$ a partir de uma Série Temporal	48
3	METODOLOGIA	51
3.1	Dados	51
3.2	Processamento do PSD e DFA	56
3.3	Processamento do Espectro Gradiente (GPA)	57
4	ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS	63
4.1	Resultados do Espectro Gradiente (GPA)	63
4.1.1	Discussão dos Resultados do Processamento do GPA	63
4.2	Resultados do Processamento do PSD e DFA	70
4.2.1	Discussão dos Resultados do Processamento do PSD e DFA	76
5	CONCLUSÕES	79
5.1	Trabalhos Futuros	81

	APÊNDICES	95
	APÊNDICE A – SÉRIES TEMPORAIS ANALISADAS	97
	APÊNDICE B – PSD E DFA	109
B.1	Densidade Espectral de Potência (PSD)	109
B.2	Análise de Flutuação Destendenciada (DFA)	113

## 1 INTRODUÇÃO

As séries temporais de emissões solares apresentam padrões de flutuação como intermitências, irregularidades e periodicidades na sua evolução, que podem conter informações sobre os mecanismos físicos associados à sua geração. Neste contexto, é importante aplicar ferramentas analíticas que permitam caracterizar tais padrões de flutuação.

Fenômenos temporais intermitentes são recorrentes na natureza, incluindo nas manifestações da atividade solar e são importantes, por exemplo, para que ocorra a reorganização do mesmo, ou seja, retornando a um estado estacionário ou de mínima energia, após algum processo de troca ou transformação de energia. Entretanto, no caso de emissões relacionadas às regiões ativas solares, surge o questionamento sobre quais são os processos envolvidos nesta reorganização, ou ainda sobre o espectro de escalas do sistema para que as trocas de energia sejam eficientes.

Portanto, para tal análise, são necessárias ferramentas eficientes, por exemplo, para a decomposição de uma série temporal nos domínios do tempo e da frequência (MORETTIN, 1999) permitindo, por exemplo, o cálculo da Densidade Espectral de Potências (PSD) (HEINZEL; RÜDIGER; SCHILLING, 2002 apud ZEFERINO, 2017b), ou dos Expoentes de Escalas via Análise de Flutuação Destendenciada (DFA) (PENG et al., 1994 apud ZEFERINO, 2017b)<sup>1</sup>, permitindo assim estudar sinais não-estacionários, caóticos, auto-organizados decorrentes de uma vasta gama de fenômenos físicos, entre os quais, são importantes as radioemissões associadas aos fenômenos solares impulsivos e as tempestades de ruído (RNS, do inglês *Radio Noise Storm*, ou correntes de emissões Tipo I) (Ver Sodré (2013) e referências citadas). As emissões solares Tipo I (descritas na Seção 2) são observadas em regiões ativas do Sol, particularmente próximas de grupos de manchas solares; sugere-se que estas explosões estejam associadas com a reestruturação do campo magnético coronal durante e brevemente após o fluxo emergente, no entanto, o mecanismo ainda não está claro (SCHRIJVER; ZWAAN, 2000). A maioria dos eventos

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> O PSD é a representação do sinal através do quadrado da amplitude, ou potência, sendo denominado também de espectro de potências; o espectro de potências de uma série temporal A(t) descreve como a variância de seus dados é distribuída ao longo dos componentes de frequência em que a A(t) pode ser decomposta, podendo ser considerado a metodologia convencional mais utilizada para classificar um processo estocástico de acordo com a lei de potência obtida a partir de seu espectro (ZEFERINO, 2017b; DANTAS, 2009; MOECKE, 2006), enquanto que o DFA consiste na determinação da auto-afinidade de um sinal através de um quantificador denominado de expoente de escala, sendo utilizado para caracterizar padrões temporais provenientes de um processo estocástico com efeito de memória ou correlação de longo alcance (ZEFERINO, 2017b) (PENG et al., 1994). Maiores detalhes sobre estas duas técnicas estão descritos no Apêndice B.

solares que afetam o clima espacial, como ejeções de massa coronal (CME) e *flares* solares são geralmente acompanhados de emissões em radiofrequências, no entanto, a maioria dos sinais em rádio de *flares* solares são caracterizados por padrões de variabilidade complexa, incluindo não-estacionariedades e não-linearidades (LOBZIN et al., 2009 apud VERONESE et al., 2011). Assim sendo, radioemissões associadas a eventos impulsivos podem prover informações sobre processos não-lineares de aceleração/injeção de elétrons e as propriedades das estruturas magnéticas coronais envolvidas (NINDOS et al., 2008 apud VERONESE et al., 2011) (ROSA, 1996).

#### 1.1 Objetivo

Com o objetivo de investigar as causas dos padrões de flutuação de radioemissões solares na faixa de microondas, Rosa et al. (2008) utilizaram, pela primeira vez, a Análise de Padrões Gradiente (GPA, do *Gradient Pattern Analysis*), e Cintra, Fernandes e Rosa (2017) discutiram a aplicação da técnica GPA para séries temporais de ruídos do tipo 1/f com metodologia diferente da conversão de séries temporais em matrizes, adotada em Assireu et al. (2002); este estudo preliminar inédito permitiu estudar emissões solares Tipo I (séries temporais de tempestades de ruído), por meio da técnica GPA, utilizando como dados comparativos ruídos canônicos, objetivando a identificação dos padrões de variabilidade das tempestades de ruído solares.

Portanto, o objetivo principal deste trabalho é consolidar a aplicação do GPA, via construção do espectro gradiente, na análise de séries temporais de radioemissões solares Tipo I, especificamente tempestades de ruído, provenientes do espectrógrafo suíço BLEN7M e armazenadas no repositório e-CALLISTO. A análise compreende ainda: (i) utilizar, pela primeira vez, na construção do espectro gradiente o Segundo Momento Gradiente ( $G_2$ ), (ii) comparar o padrão de flutuação das tempestades Tipo I com padrões canônicos (estocásticos e caóticos) e (iii) comparar o desempenho da técnica GPA introduzida aqui com PSD e DFA.

Do ponto de vista da física solar, esta dissertação tem como meta responder a seguinte pergunta: "com base nos espectros gradiente, qual é o padrão de flutuação canônico que mais se aproxima do padrão de flutuação das tempestades Tipo I selecionadas?".

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Para introduzir os principais conceitos necessários para compreender a importância das análises e estudos desta Dissertação, esta Seção 2 de revisão da literatura será dividida em duas partes: revisão dos conceitos físicos referentes às emissões solares, em particular as radioemissões caracterizadas como tempestades de ruído e revisão dos conceitos de análise de séries temporais envolvidos na metodologia de análise espectral.

### 2.1 Emissões Solares

O Sol é um esfera de gás ionizado, composto basicamente de Hidrogênio (H) (cerca de 92%) e Hélio (He) (menos de 8%), apresentando menos de 1% de elementos mais pesados, como Oxigênio (O), Carbono (C) e Nitrogênio (N) (FILHO; SARAIVA, 2004). A estrutura solar é comumente dividida em duas regiões: o interior solar e a atmosfera solar, sendo o interior a região compreendida desde o núcleo até abaixo da fotosfera, muitas vezes denominada superfície solar (apesar do Sol não apresentar uma superfície sólida) (HATHAWAY, 2013).

Por sua vez, a atmosfera solar é composta pela fotosfera, a cromosfera e a coroa. A fotosfera, com apenas cerca de 500 km de espessura, é a camada a partir da qual não é possível visualizar as camadas mais internas e onde é gerada a luz em comprimento de ondas no visível. A cromosfera, situada acima da fotosfera é uma camada na qual a temperatura volta a ser elevada, possibilitando a emissão H- do hidrogênio que confere a esta camada sua principal emissão (HATHAWAY, 2011). Por fim, tem-se a coroa solar, cujos limites não são bem definidos, a densidade do plasma coronal é 2 a 3 ordens de grandeza mais baixa do que a encontrada na cromosfera e ela se estende por todo o meio interplanetário (KUTNER, 2003). Na cromosfera e na coroa, a temperatura atinge de milhares a milhões de graus, e podem ser observadas em comprimentos de onda no visível, no ultravioleta e em frequências de rádio (SILVA, 2006), em particular em comprimentos de onda métricos (30 - 300 MHz) (MCLEAN, 1981). Toda a atmosfera solar é permeada por campos magnéticos que desempenham importante papel na geração das explosões solares, como descrito na Seção 2.1.1 a seguir.

Figura 1 – Imagem no ultravioleta extremo de arcos magnéticos coronais, obtida pelo satélite TRACE (*Transition Region And Coronal Explorer*).



Fonte: (NASA, 2002).

## 2.1.1 O Campo Magnético na atividade solar

Como mencionado na Seção 2.1 anterior, a atmosfera solar é permeada por campos magnéticos, que são gerados no interior solar e emergem através da fotosfera, onde surgem as manchas solares (LANG, 2013; HATHAWAY, 2010). De acordo com Fan (2009), o campo é gerado abaixo da fotosfera, numa fina região conhecida como tacoclina (onde o transporte de energia deixa de ser por radiação e passa a ser por convecção). Instabilidades, tais como torções e adensamentos nas linhas de campo, aumentam a pressão magnética e ele se torna convectivamente instável e emerge à superfície, dando origem às manchas solares na fotosfera e uma estrutura complexa na atmosfera solar conhecida como região ativa (FAN, 2009). As manchas solares geralmente aparecem com polaridades magnéticas opostas.

Campos magnéticos são descritos por linhas de força e a direção das linhas de força e a orientação dos campos magnéticos podem ser inferidas da polarização das linhas espectrais. Campos magnéticos orientados para fora do Sol têm polaridade magnética positiva, enquanto os campos magnéticos apontados para dentro têm polaridade negativa (LANG, 2013).

Os campos magnéticos associados às regiões ativas são caracterizados por arcos magnéticos, muitas vezes identificados em imagens registradas em raios X e no extremo ultravioleta, conforme ilustrado na Figura 1.

No plasma da atmosfera solar, as partículas carregadas (elétrons e íons) presentes

sofrem a força (de Lorentz) exercida pelo campo magnético, e executam movimentos de espirais ao longo das linhas de campo. No entanto, quando a energia cinética é superior à energia magnética (devido a altas temperaturas ou a campos magnéticos menos intensos) as partículas podem não se manter confinadas em suas órbitas e difundirem através das linhas de campo. Estes dois regimes podem ser representados pelo parâmetro  $\beta$  do plasma, que mede a razão entre a pressão térmica e a pressão magnética. Na maior parte da coroa solar,  $\beta < 1$ , ou seja, o plasma é magneticamente confinado e as partículas ionizadas estão confinadas dentro dos arcos coronais. Por outro lado, na fotosfera e baixa cromosfera, e na coroa exterior, a pressão do gás domina a pressão magnética,  $\beta > 1$ , permitindo que o campo magnético seja transportado pelo gás em movimento ou que as partículas escapem através do campo (ASCHWANDEN, 2005; GARY, 2001).

Os campos associados às regiões ativas geralmente evoluem para armazenar enormes quantidades de energia magnética. No entanto, devido à dinâmica da cromosfera e da coroa os campos magnéticos complexos podem sofrer torções e reconexões. Tais processos acarretam, muitas vezes a conversão da energia magnética armazenada em energia térmica e cinética depositada no plasma da atmosfera gerando eventos eruptivos como os *flares* solares a as ejeções de massa coronal (do inglês CME, *Coronal Mass Ejection*).

#### 2.1.2 *Flares* Solares

Os chamados *flares* solares (ou simplesmente explosões solares) são, junto com as CMEs, os fenômenos mais energéticos do Sistema Solar (EMSLIE et al., 2004). Os *flares* solares liberam energias da ordem de  $10^{29}$  -  $10^{33}$  erg (KANE et al., 1995; VLAHOS, 1989).

Pela definição de Hudson (1982), um *flare* solar é "uma perturbação transitória que ocorre na atmosfera solar". Porém, tal definição é muito geral, pois não leva em consideração as escalas espaciais e temporais envolvidas no evento. Por sua vez, Zirin (1988) define um *flare* solar como "um crescimento transitório na brilhância em H $\alpha$ , com intensidade, no mínimo, duas vezes maior que a intensidade cromosférica, geralmente impulsivo e acompanhado de um crescimento em raios X e fluxo em radiofrequências".

Os *flares* solares dão origem a intensas emissões em raios X e atualmente são monitoradas regularmente por satélites geoestacionários e suas intensidades são prontamente disponibilizadas pela Internet; a intensidade é indexada em diferentes classes (A, B, C, M, X) de acordo com o fluxo de raio X conforme a Tabela 1 e dentro de cada classe a intensidade é dada em decimais, por exemplo, M7.5 indica o fluxo 7.5  $\times 10^{-5} Wm^{-2}$  (KOSKINEN, 2011).

Importância	Fluxo em raios X $(W/m^2)$	
А	$10^{-8} a 10^{-7} W m^{-2}$	
В	$10^{-7} a 10^{-6} W m^{-2}$	
$\mathbf{C}$	$10^{-6} a 10^{-5} W m^{-2}$	
$\mathbf{M}$	$10^{-5} a 10^{-4} W m^{-2}$	
X	$\geqslant 10^{-4} \mathrm{~W} m^{-2}$	

Tabela 1 – Classificação de *flares* solares baseada em emissão raio X.

Fonte: adaptada de Koskinen (2011).

O modelo padrão para a ocorrência de um *flare* solar envolve a conversão da energia magnética por reconexão das linhas de campo dos arcos magnéticos associadas às regiões ativas (MELROSE, 1993). Pode ocorrer no topo dos arcos magnéticos (HOLMAN, 1985; MASUDA et al., 1995) ou na zona de interação de arcos magnéticos distintos (regiões de aceleração, como ilustradas na Figura 2).

Figura 2 – Representação esquemática simplificada de um arco magnético e da região de reconexão magnética e liberação de energia durante um *flare* solar.



Fonte: adaptada de Lang (2013).

A reconexão magnética permite a liberação da energia magnética nas regiões com linhas de campo de polaridade oposta, como no topo dos arcos magnéticos das regiões ativas, gerando os flares. Em cerca de 3 a 10 minutos, que representa a duração típica de um *flare*, mais de  $10^{29}$  ergs de energia magnética é convertida em aceleração de partículas carregadas, preferencialmente elétrons, aquecimento do plasma e ejeção de material solar (EMSLIE et al., 2004). Devido a processos secundários decorrentes, esta energia é liberada na forma de radiação eletromagnética em um amplo intervalo de pequenos comprimentos de onda, desde raios  $\gamma$  (com comprimentos da ordem de Å) e raios X, até comprimentos de onda métricos e mesmo quilométricos, das ondas na faixa de rádio.

Parte dos elétrons acelerados durante um *flare* fica aprisionada descrevendo órbitas espirais ao longo das linhas dos arcos magnéticos e, consequentemente, emitindo radiação na faixa de ondas milimétricas e centimétricas, devido ao mecanismo girossincrotrônico (KUNDU, 1965). E parte dos elétrons acelerados pode escapar ao longo das linhas de campo dos arcos magnéticos e se propagar caracterizando um feixe de elétrons não-térmicos<sup>1</sup> com velocidades da ordem de 0,1 - 0,3 c (sendo c a velocidade da luz no vácuo) rumo à coroa ou para os pés dos arcos magnéticos.

Um *flare* solar intenso pode acarretar a aceleração de aproximadamente  $10^{37}$  elétrons/seg a energias acima de 20 keV por períodos de dezenas de segundos a minutos (BENZ; BASTIAN; GARY, 1998; MILLER et al., 1997). Portanto, o estudo de *flares* impulsivos é de suma importância na investigação do processo de liberação de energia e aceleração de partículas, uma vez que tais partículas aceleradas são responsáveis por diversos fenômenos de radioemissão subsequentes, como as emissões Tipo I e tempestades de ruído em ondas métricas, tema desta Dissertação e cujos mecanismos de emissão dependem do comprimento de onda e das condições locais da fonte emissora (BENZ; BASTIAN; GARY, 1998)

### 2.1.3 Explosões Solares em Rádio

As ondas de rádio provenientes do Sol foram detectadas pela primeira vez em 1942, por G. C. Southworth e J. S. Hey (STIX, 2002) e desde então foram ganhando maior importância nas investigações científicas, de forma que representam, atualmente, a segunda faixa de frequência mais explorada nas observações solares, atrás apenas da faixa do visível

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Elétrons não-térmicos caracterizam-se por terem distribuição de energias superior à distribuição maxwelliana dos elétrons térmicos do meio. Os feixes de elétrons não-térmicos, são acelerados durante um *flare* e viajam ao longo das estruturas magnéticas fechadas (*loops*) na cromosfera e na baixa coroa solar, e podem interagir com o plasma da atmosfera gerando radioemissões pelo mecanismo de emissão de plasma (WILD, 1950 apud MELROSE, 1985) (GINZBURG; ZHELEZNIAKOV, 1959 apud MELROSE, 1985). Quando os feixes de elétrons mais energéticos precipitam para os pés do arco magnético, na baixa cromosfera, e encontram altas densidades (superiores a 10<sup>11</sup> cm<sup>-3</sup>) do plasma térmico, são geradas as emissões em raios X duros pelo mecanismo *bremsstrahlung*.

(ASCHWANDEN, 2005).

Uma descrição detalhada dos vários mecanismos de emissão em radiofrequências associados aos *flares* solares foi apresentada por Aschwanden (2002) e revisados por Aschwanden (2004).

As explosões solares em rádio são provas muito efetivas do estado físico da atmosfera explosiva do Sol, fornecendo uma importante ferramenta de diagnóstico para estudos das estruturas magnéticas, sua variabilidade e evolução (LANG, 2009).

O diagnóstico das radioemissões solares é realizado por radiotelescópios e radioespectrógrafos que operam na superfície e observam entre 10 e 8.000 MHz (LANG, 2009).

As radioemissões solares registradas na faixa de ondas métricas foram classificadas originalmente em 5 tipos desde a década de 1950, com base principalmente nas morfologias (características espectro-temporais). Desta forma, as emissões são classificadas principalmente em emissões tipos I, II, III, IV e V (BENZ; MEYER; MONSTEIN, 2005; MCLEAN, 1985).

Na Figura 3, pode-se observar uma representação esquemática de um espectro dinâmico, mostrando as radioemissões solares associadas e um *flare* solar.

As principais características de cada um dos tipos de emissão, segundo essa classificação, são:

- Tipo I: apresentam banda estreita (alguns MHz) e curta duração (1 s). Ocorrem aos milhares, compondo correntes de Tipo I e tempestades de ruído em rádio de longa duração (de horas a dias). Apresentam temperaturas de brilho entre 10<sup>7</sup> e 10<sup>9</sup> K, atribuídas a elétrons acelerados com energias de alguns keV, em um arco magnético em regiões ativas (LANG, 2009; MCLEAN, 1985; WARMUTH; MANN, 2004).
- Tipo II: apresentam duração de alguns minutos, baixa frequência de corte (0,1 a 60 MHz), e lenta taxa de deriva em frequência (de 0,1 a 1,5 MHz/s), de alta para baixa frequência, sugerindo um movimento da fonte em direção ao exterior de cerca de 1.000 km, cuja geração é atribuída a ondas de choque e CMEs. São observadas geralmente em comprimentos de onda métricos entre 0,1 e 100 MHz (SILVA, 2012;
Figura 3 – Espectro dinâmico esquemático de radio<br/>emissões solares observadas no intervalo de radiofrequências (10 - 3000 MHz) durante e após um *flare* solar intenso.



Fonte: adaptada de Warmuth e Mann (2004).

SILVA; FERNANDES; SELHORST, 2014; KLEIN et al., 1997; RAMESH et al., 2010).

- Tipo III: Emissões em comprimentos de onda métricos e decimétricos mais comuns, associadas a flares, observadas de 0,1 a 8.000 MHz, são caracterizadas por uma alta taxa de deriva (até cerca de 100 MHz/s), seja de altas para baixas frequências (normal) ou de baixa para altas frequências (inversa). São atribuídas a feixes de elétrons acelerados com energias cinéticas de 10 100 keV e velocidades semi-relativísticas, ou até 150.000 km/s. As emissões tipo U, J, N e M são variantes das emissões Tipo III, classificadas de acordo com as diferentes morfologias (FERNANDES; SAWANT, 1996; FERNANDES et al., 2000; FERNANDES et al., 2012; MCLEAN, 1985; MELÉNDEZ et al., 1999; MÉSZÁROSOVÁ et al., 2008).
- Tipo IV: Radiações contínuas em bandas largas, durando até 1 hora após o início da fase impulsiva de um flare. A radiação de uma emissão Tipo IV é parcialmente circularmente polarizada, e tem sido atribuída à emissão síncrotron de elétrons energéticos aprisionados em nuvens magnéticas que viajam ao espaço com velocidades de centenas a milhares de km/s (MCLEAN, 1985; ROSOVÁ et al., 2009; WARMUTH; MANN, 2004).

Tipo V: Emissões intensas e duradouras na faixa de frequências de 20 a 100 MHz, caracterizada por períodos de emissão contínua (de 10 segundos a 2 minutos), iniciadas durante ou após a ocorrência de um grupo de emissões Tipo III, sugerindo que sejam resultantes da emissão de plasma de elétrons removidos dos feixes associados às emissões Tipo III, desacelerando, deste modo, sua propagação (MCLEAN, 1985; MANGENEY; RAOULT; VLAHOS, 1990; WARMUTH; MANN, 2004; WILD, 1985).

### 2.1.4 Explosões Tipo I e Tempestades de Ruído

Em 1946, após a detecção de emissões em rádio de atividade solar, J.S. Hey notou uma radiação conectada com a aparição de grandes manchas solares no disco solar; tais emissões em rádio de longa duração em ondas métricas ( $\nu \leq 300$  MHz), compostas de bandas estreitas, explosões na forma de rajadas e bandas contínuas, ficaram conhecidas pelo nome de tempestades de ruídos (ou emissões Tipo I contínuas) (BENZ, 2002).

A largura de banda das explosões Tipo I são poucos por cento da frequência central, e a duração é menor do que um segundo, conforme pode-se observar na Figura 4; as explosões ocorrem em taxas tão altas quanto um por segundo; sugere-se que suas fontes são devido à superfície de contato do fluxo magnético emergente com o campo magnético preexistente, e, em geral, são interpretados como assinaturas de muitos pequenos passos cujo efeito cumulativo é a evolução gradual da coroa (BENZ, 2002).

De acordo com Elgarøy (1961), uma emissão solar Tipo I isolada (geralmente chamada em inglês de *burst*) é o fenômeno de menor duração observado nas radioemissões solares e a emissão elementar de uma tempestade de ruído. No presente trabalho, o termo emissão Tipo I será utilizado para a emissão individual de curta duração e banda estreita e o termo tempestade de ruído para o conjunto de milhares de emissões Tipo I, como adotado por Sodré (2013).

Por sua vez, as chamadas tempestades de ruído são formadas de milhares de *bursts* Tipo I de curta duração, por vezes sobrepostos a um contínuo de variação lenta, registradas em comprimentos de onda métricos (30 MHz a 300 MHz) (KAI; MELROSE; SUZUKI, 1985). De acordo com Malville (1962 apud SODRÉ, 2013), as tempestades raramente são observadas abaixo de 150 MHz e acima de 350 MHz. No entanto, Sodré (2013), Silva, Fernandes e Sodré (2015) e Fernandes e Sodré (2016) analisaram 255 correntes Tipo I registradas em 2011 pelo espectrógrafo BLEN7M da rede e-CALLISTO até 450 MHz.

Figura 4 – Espectro dinâmico do fragmento de uma tempestade de ruído, mostrando cadeia de emissões Tipo I registradas pelo espectrógrafo BLEN7M da rede e-CALLISTO, em 30 de julho de 2011 ( $\sim 07:45 - 08:00$  UTC).



Fonte: (MONSTEIN, 2011q).

As tempestades de ruído não estão obrigatoriamente relacionadas à ocorrência de flares solares em raios X (SILVA; FERNANDES; SODRÉ, 2015), mas ocorrem decorrentes do aparecimento e do crescimento de regiões ativas complexas, sugerindo que as tempestades de ruídos são assinaturas de reorganizações coronais devido a mudanças na configuração e evolução do campo magnético no limite fotosférico das regiões ativas (BENZ, 2002). Li et al. (2017) analisaram uma tempestade de ruído de 30 de julho de 2011 e identificaram uma boa correlação espacial entre as radioemissões Tipo I e atividades magnéticas no Extremo Ultravioleta (EUV).

Considerando, portanto, o possível papel da reorganização do campo magnético fotosférico na geração das tempestades de ruído, Silva, Fernandes e Sodré (2015) e Fernandes, Sodré e Wrasse (2018) aplicaram a metodologia apresentada por Santos e Wrasse (2016), na análise da evolução temporal do espectro de potência magnético. Os resultados apontaram índices espectrais maiores que 5/3, indicando a possibilidade de transferência de energia de pequenas para grandes estruturas, como possível responsável pela manutenção das emissões de longa duração das tempestades analisadas.

Segundo Benz (2002), existem dois aspectos observacionais que necessitam ser levados em consideração com relação à fenomenologia das tempestades de ruídos, sua geração e manutenção. O primeiro, é que as tempestades de ruídos são geralmente acompanhadas por elétrons não-térmicos (com energias superiores a dos elétrons térmicos do plasma ambiente), associados principalmente às emissões Tipo III métricas, em frequências abaixo das explosões Tipo I. Além disso, as tempestades de ruídos contínuas podem ser causadas por elétrons aprisionados nos *loops* magnéticos coronais e o número de elétrons acelerados na tempestade é insuficiente para produzir raios X duros (BENZ, 2002).

O segundo aspecto é que, diferente das emissões Tipo III, as tempestades de emissões Tipo I podem perdurar por horas ou até dias, apontando que os mecanismos de geração e manutenção podem não estar apenas relacionados com feixes de elétrons energéticos, mas com mecanismos que podem estar ligados a variações não tão súbitas e drásticas na distribuição do campo, como as que geram os flares solares pela reconexão magnética, mas ligadas possivelmente à turbulência do plasma e à propagação de irregularidades e ondas nas regiões de emissão.

Apesar de muitas observações e registros de tempestades de ruído, apenas mais recentemente passaram a ser melhor estudadas devido ao aperfeiçoamento dos instrumentos, com melhor sensibilidade e resolução e também pela melhoria nas ferramentas computacionais de análise dos dados. Mesmo assim ainda há muita discussão e controvérsia sobre os processos físicos e os mecanismos responsáveis por estas emissões. Foi proposto que as explosões solares Tipo I são emissões de turbulência de baixa frequência, as ondas podem coalescer como ondas eletromagnéticas de alta frequência (como ondas de *Langmuir*, ou outras instabilidades), sendo transformadas em ondas transversais em radiofrequências, que escapam na forma de emissão eletromagnética (BENZ, 2002).

As ondas de alta frequência têm origem provavelmente em elétrons não-térmicos, que podem ser acelerados em local de explosão Tipo I, depois serem aprisionados, e produzirem ondas de alta frequência em locais distintos do flare. Segundo Benz (2002), uma tempestade contínua pode se originar das mesmas ondas de alta frequência; a presença temporária de ondas de baixa frequência em regiões localizadas pode aumentar a emissão e produzir as explosões. Para Benz, Huba e Spicer (1982), a principal questão, de um mecanismo efetivo para a manutenção da radiação por longos períodos das tempestades, é a identificação de qual forma de energia livre transporta a tempestade, uma vez que a energia necessária para gerar a radioemissão em ondas métricas associada com tempestades Tipo I (ao redor de  $10^{18}$  erg) é muito pequena se comparada com a energia necessária para o aquecimento da coroa solar. Karlický (2017), propõe um modelo de emissão para correntes de emissões tipo semelhante ao proposto para DPS (*drifting pulsation structures*), baseado nas similaridades e diferenças apresentadas por tais emissões.

A partir de resultados de análises de tempestades de ruído, Iwai et al. (2012) identificaram que as tais emissões devem estar relacionadas com a evolução das estruturas magnéticas coronais ou com sua ejeção, que alteram as propriedades das partículas do plasma nas região ativas. Portanto, as emissões geradas devem depender de muitos processos como a aceleração de partículas, a geração de ondas e a presença de processos turbulentos, por exemplo. De modo que o fluxo das emissões pode ser modulado por um ou mais de um desses processos, sendo fundamental aplicar análises adequadas na identificação do(s) processo(s) de plasma que causa(m) a variação temporal e espectral das tempestades.

Entre as análises que têm sido empregadas, pode-se citar os trabalhos de Iwai et al. (2013), que analisaram radioemissões Tipo I observadas em 26 de janeiro de 2011 com alta resolução com o radiotelescópio AMATERAS, e obtiveram uma distribuição da lei de potência do pico de fluxo das emissões, com um índice espectral entre 4 e 5.

# 2.2 Padrões de Flutuação e Leis de Potência em Séries Temporais

Os padrões de flutuação em séries temporais relacionadas a processos não lineares que seguem leis de escala (K), em geral estão relacionados com leis de potência  $P(K) \propto K^{\beta}$ as quais descrevem processos estocásticos difusivos, turbulentos e críticos (como é o caso da Criticalidade Auto-Organizada).

Processos estocásticos produzem vários tipos de sinais, como é o caso dos ruídos (*noises*) do tipo 1/f: Ruído Branco (*White Noise*), Rosa (*Pink Noise*), Vermelho ou Browniano (*Red Noise*), e Preto (*Black Noise*) (ASCHWANDEN, 2011).

A definição do espectro de potência de vários tipos de ruídos nos permite construir uma variedade de modelos analíticos que são necessários para entender e identificar fenômenos complexos de acordo com suas características de ruído intrínsecas como, por exemplo, as radioemissões solares impulsivas (ASCHWANDEN, 2011).

1. Espectros de Potência 1/f

A variabilidade de uma fonte astrofísica é frequentemente estudada da estatística da taxa de contagem de séries temporais, ou de distribuições da densidade espectral de potência de Fourier; espectros de potência são classificados em ruídos 1/f: espectros de Ruído Branco, Rosa, Vermelho, e Preto, dependendo da sua inclinação média espectral (ASCHWANDEN, 2011).

a) Ruído Branco  $(1/f^0)$ 

Séries temporais f(t) são frequentemente analisadas com a transformada de Fourier  $P(\nu)$ , que decompõe um perfil temporal em uma soma de funções harmônicas, isto é,

$$exp(-i2\pi\nu t/n) = \cos(2\pi\nu t/n) + isen(2\pi\nu t/n), \tag{1}$$

onde n é o número total de pontos, t é discreto, e a amplitude para cada frequência  $\nu$  é especificada com um espectro de potência  $P(\nu)$  no espaço de frequência, na sua forma complexa, conforme a Equação 2 (ASCHWANDEN, 2011).

$$P(\nu) = \frac{1}{n} \sum_{t=0}^{n-1} f(t) \exp\left(-\frac{i2\pi\nu t}{n}\right)$$
(2)

A densidade espectral de potência é geralmente expressa com um número real, calculando o valor absoluto do espectro de potência complexo, isto é,  $|P(\nu)|$ , que descarta a informação de fase que está contida no número complexo do espectro de potência  $P(\nu)$  (ASCHWANDEN, 2011).

A Transformada de Fourier é particularmente útil para extrair pulsos periódicos com um período particular em uma série temporal, mesmo na presença de um forte ruído; se existem múltiplas flutuações periódicas presentes em uma série temporal, o espectro de potência irá revelar cada uma com um pico no espectro de potência no particular período ou frequência (ASCHWANDEN, 2011). No entanto, o espectro de potência de um processo aleatório se comporta de forma diferente; ao calcular sua densidade espectral de potência  $P(\nu)$  com a Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform*), encontra-se um espectro de potência completamente plano da frequência mínima  $\nu_{min} = 1/(n\Delta t)$ até a frequência máxima  $\nu_{max} = 1/(2\Delta t)$ , isto é, a metade da frequência de amostragem que é a chamada frequência de Nyquist ou frequência de corte (ASCHWANDEN, 2011).

Uma vez que esta potência constante em todas as frequências é similar à luz branca, consistindo em todas as cores no intervalo de comprimento de onda visível, tal espectro de potência plano é também chamado de espectro do Ruído Branco (ASCHWANDEN, 2011).

b) Ruídos  $1/f^{\beta}$ 

Além do espectro do Ruído Branco, existe uma classe mais geral de espectros de ruídos, os quais possuem em comum a densidade espectral de potência  $P(\nu)$  é proporcional à lei de potência negativa da frequência  $\nu$ ,

$$P(\nu) \propto \nu^{-\beta} \tag{3}$$

com o índice de potência  $\beta$  sendo encontrado mais frequentemente na faixa de 0 <  $\beta$  < 2; uma vez que a maioria dos espectros encontrados na natureza e tecnologia possuem um valor próximo de  $\beta \approx 1$ , esta classe de espectros de ruídos é chamada também de ruído 1/f, onde f significa a frequência, e 1/f corresponde a  $\nu^{-1}$  (ASCHWANDEN, 2011).

Espectros de ruído 1/f ocorrem mais comumente na natureza e tecnologia, porque possuem um balanço de flutuações curtas e longas, de diferentes processos, como ocorrem em semicondutores, diodos, transistores, ou filmes, mas também na rotação da Terra, congestionamentos, ou membranas de nervos (SCHUSTER, 1988 apud ASCHWANDEN, 2011).

Esta nomenclatura de espectros de ruídos vem da analogia dos espectros de cores: a luz branca é definida como a soma de todos os comprimentos de onda visíveis do ultravioleta ( $\lambda \approx 2.000$  Å) a infravermelho ( $\lambda \approx 8.000$  Å), e, portanto, um espectro de ruído plano é chamado de espectro de Ruído Branco

(ASCHWANDEN, 2011). Um espectro de cor que possui mais cor vermelha possui uma abundância de longos comprimentos de onda  $\lambda$ , ou baixas frequências  $(\nu = c/\lambda)$ , e caindo com frequências mais altas, isto é, como um espectro de lei de potência  $P(\nu) \propto \nu^{-\beta}$  com um índice de potência  $\beta$  positivo; um espectro de ruídos que cai com a segunda potência,  $P(\nu) \approx \nu^{-2}$ , é nomeado de Ruído Vermelho, mais comumente conhecido como Ruído *Browniano*, uma vez que ocorre em movimento molecular *Browniano*; espectros de ruído que estão entre o espectro do Ruído Branco ( $\beta = 0$ ) e o espectro do Ruído Vermelho ( $\beta =$ 2), com  $\beta \approx 1$ , são nomeados de espectros do Ruído Rosa, para indicarem a mistura das cores branca e vermelha (ASCHWANDEN, 2011).

O Ruído *Browniano* também é conhecido como Ruído *Brown*, mas não se refere à cor, ao invés disso se refere a Robert Brown, pela descoberta do movimento *Browniano* (ASCHWANDEN, 2011).

A lei de potência fica ainda mais íngreme, chegando a  $\beta \approx 3$ , para alguns fenômenos, a qual é nomeada de espectro do Ruído Preto, em analogia à extensão do espectro de cor ao invisível além do vermelho; o fenômeno do Ruído Preto governa catástrofes naturais e não-naturais, como enchentes, secas, ações de mercado financeiro em queda, ou falta de energia (SCHROEDER, 1991 apud ASCHWANDEN, 2011).

Pode-se visualizar um exemplo dos principais espectros na Figura 5: espectro do Ruído Branco ( $\beta = 0$ ), espectro do Ruído Rosa ( $\beta = 1$ ) e espectro do Ruído Vermelho (também conhecido como Ruído Browniano (*Brown Noise*) ( $\beta = 2$ ) (ASCHWANDEN, 2011).

Multiplica-se um espectro de Ruído Branco pela função de lei de potência apropriada  $P(\nu) \propto \nu^{-\beta}$  e construir a série temporal f(t) correspondente pela transformada inversa de Fourier (com a Transformada direta de Fourier definida pela Equação 2), conforme a Equação 4 (ASCHWANDEN, 2011).

$$f(t) = \frac{1}{n} \sum_{t=0}^{n-1} P(\nu) \exp\left(+\frac{i2\pi\nu t}{n}\right)$$

$$\tag{4}$$

O espectro do Ruído Branco é multiplicado com uma função  $\nu^{-\beta}$  com  $\beta = 1$ , 2, 3; os perfis temporais resultantes mostram uma mistura de pulsos curtos e



Figura 5 – Séries de ruídos 1/f e seus espectros correspondentes.

Fonte: (WARD; GREENWOOD, 2007).

mais longos para o caso do espectro do Ruído Rosa, mas são completamente dominados por pulsos de longa duração para os casos do espectro do Ruído Preto, uma vez que ruído de alta frequência é fortemente suprimido para  $\beta \gtrsim$ 2; um modo natural de produzir espectros de ruídos 1/f é aplicar um filtro de passa alta a um sinal de Ruído Branco (ASCHWANDEN, 2011). Em séries temporais astrofísicas, processos aleatórios com ruídos 1/f já foram estudadas extensivamente, para discriminar entre ruídos de fótons e sinais significantes de *flares* solares, a *flares* estelares, variáveis cataclísmicas, estrelas de nêutrons, pulsares, e candidatos a buracos negros (ASCHWANDEN, 2011).

Considerando que o objetivo principal deste trabalho é aplicar o método GPA (para análise de séries temporais de tempestade de ruído solares (explosões Tipo I), a próxima Seção 2.3 abordará a explicação teórica e prática sobre a técnica GPA e seu Segundo Momento Gradiente  $(G_2)$ .

## 2.3 Análise de Padrões Gradiente (GPA)

O método de Análise de Padrões Gradiente (em inglês *Gradient Pattern Analysis* - GPA) parte do princípio de que a complexidade de um padrão espacial bidimensional é caracterizada pelo grau da sua assimetria bilateral em relação aos quatro eixos de simetria (perpendiculares e diagonais) (ASSIREU et al., 2004 apud CORDEIRO, 2015).

O coeficiente de assimetria bilateral é calculado sobre o campo gradiente de uma matriz caracterizando diferentes padrões de assimetria gradiente (CORDEIRO, 2015). Tais padrões podem estar relacionados a processos dinâmicos subjacentes como reação-difusão, caos espaço-temporal e turbulência (FREITAS, 2012 apud CORDEIRO, 2015).

A técnica GPA (ROSA; SHARMA; VALDIVIA; ROSA; SHARMA; VALDIVIA, 1998, 1999 apud ROSA et al., 2018) foi estabelecida com o objetivo de caracterizar regimes complexos provenientes de turbulência em plasmas, sendo projetado para a utilização com matrizes bidimensionais, e também sendo adaptada para análise de séries de dados unidimensionais, conforme Assireu et al. (2002 apud CORDEIRO, 2015), e seu refinamento mais recente a consolidou como a técnica mais apurada para a classificação morfológica de galáxias (ROSA et al., 2018).

## 2.3.1 Cálculo do Segundo Momento Gradiente $(G_2)$ a partir de uma Matriz

O método foi desenvolvido para estimar as propriedades de um conjunto de pontos, que é geralmente representado em um espaço de 2 dimensões (2D) (ROSA et al., 2018). Imagens astronômicas, representadas por N × N *pixels*, podem ser tratadas como um conjunto de vetores 3D  $\mathbf{m} = (x_i, y_i, I(x_i, y_i))$ ,  $\mathbf{i} = 1, ..., N^2$ , onde  $I(x_i, y_i)$  é a contagem digital medida em um dado pixel,  $x_i, y_i$  (ROSA et al., 2018). Representando imagens como distribuições de contagens, o gradiente local é calculado como as primeiras diferenças parciais de  $I(x_i, y_i)$  com respeito a cada elemento vizinho na matriz  $\mathbf{m}$  (ROSA et al., 2018). A operação retorna as componentes x e y do gradiente numérico 2D,  $\nabla M$ , que pode ser caracterizado por cada norma vetorial local e sua orientação (ROSA et al., 2018). O espaçamento entre pontos em cada direção é assumido como sendo 1 (ROSA; SHARMA; VALDIVIA; ROSA et al., 1999, 2003 apud ROSA et al., 2018) (ROSA et al., 2018).

No formalismo do GPA,  $\nabla M$  pode ser representado como uma composição dos

seguintes padrões gradiente (GP): GP1 (a representação matricial da distribuição vetorial total  $\nabla$ M); GP2, (a matriz das respectivas normas); GP3 (a matriz das respectivas fases); e GP4 (a matriz dos respectivos números complexos compostos por GP2 e GP3) (ROSA et al., 2018). Para maiores detalhes, ver Ramos et al. (2000 apud ROSA et al., 2018) e Rosa et al. (2003 apud ROSA et al., 2018) (ROSA et al., 2018).

Ainda, para cada tipo de padrão matricial do conjunto GP1, GP2, GP3, GP4 pode-se calcular parâmetros específicos que são definidos por Rosa et al. (2003 apud ROSA et al., 2018) como os respectivos momentos gradiente:  $G_1$ ,  $G_2$ ,  $G_3$ ,  $G_4$ , onde cada um é extraído do seu respectivo padrão matricial, que são, respectivamente, as representações vetorial, da norma, da fase e complexa (ROSA et al., 2018).

Na literatura referente ao GPA, já existem duas medidas consolidadas para o primeiro e quarto momentos gradiente; enquanto o primeiro momento gradiente, definido a partir de uma abordagem geométrica por Rosa, Sharma e Valdivia (1999 apud ROSA et al., 2018) funciona bem para caracterizar padrões estáticos e dinâmicos, o quarto momento gradiente, definido por Ramos et al. (2000 apud ROSA et al., 2018) foi mais efetivo somente para padrões dinâmicos (domínio espaço-temporal) (ROSA et al., 2018).

# 2.3.2 O Segundo Momento Gradiente $(G_2)$

O segundo momento gradiente  $(G_2)$  foi desenvolvido (considerando as dificuldades inerentes à morfologia de galáxias via análise de imagens digitais, como a necessidade de segmentação) a partir de melhorias que foram incorporadas à primeira operação do GPA que lida com a geração do campo gradiente da imagem: (i) o gradiente deve ser calculado desconsiderando os elementos nas bordas, portanto gerando um campo gradiente com (N -2) × (N - 2) posições quando a matriz é quadrada, e (ii) permitir o cálculo em uma matriz retangular (ROSA et al., 2018). Além disso, uma medida GPA apropriada para imagens astronômicas deve ser invariante ao tamanho da imagem e menos sensível ao ruído do que o  $G_1$  (ROSA et al., 2018).

Considerando tais condições, deriva-se uma medida eficiente baseada somente na matriz das normas (GP2) (ROSA et al., 2018). Deste modo, o segundo momento gradiente, dentro do formalismo do GPA, é introduzido conforme a Equação 5 (ROSA et al., 2018),

$$G_2 = \frac{V_A}{V} \left( 2 - \frac{\left|\sum_{i}^{V_A} v_i\right|}{\sum_{i}^{V_A} \left|vi\right|} \right)$$

$$(5)$$

onde V é a quantidade total de vetores gradiente e  $V_A$  é a quantidade de vetores assimétricos após a remoção de todos os pares simétricos, representando as mesmas quantidades previamente definidas pela determinação de  $G_1$  (ROSA et al., 2018). Então, o  $\sum_{i}^{V_A} v_i$  é a soma vetorial assimétrica e |vi| é a  $i^{th}$  norma vetorial assimétrica (ROSA et al., 2018). Deve-se notar que para vetores desalinhados, a soma vetorial tende a zero. (ROSA et al., 2018)

De modo mais formal, pode-se escrever  $|\sum_{i}^{V_A} v_i| = 0$ , então  $G_2 = 2\frac{V_A}{V}$  (ROSA et al., 2018).

Visto que K vetores com mesmo módulo são alinhados,  $|\sum_{i}^{V_A} v_i| = K |v_i|$ , e  $\sum_{i}^{V_A} |v_i| = K |v_i|$  (ROSA et al., 2018).

Além disso,  $G_2 = \frac{V_A}{V} \left( 2 - \frac{K |v_i|}{K |v_i|} \right) = \frac{V_A}{V}$ , significando que este operador considera a proporção de vetores assimétricos e, sem usar explicitamente as fases (GP3), a taxa de alinhamento correspondente (ROSA et al., 2018).

Altos valores de  $G_2$  significam que a grade gradiente possui muitos vetores assimétricos desalinhados, e consequentemente uma alta diversidade de valores na matriz GP2 (ROSA et al., 2018). Deste modo, o cálculo de  $G_2$  em matrizes canônicas demonstra alto desempenho na caracterização de padrões assimétricos canônicos investigados em Rosa, Sharma e Valdivia (1999 apud ROSA et al., 2018).

A operação para computação do  $G_2$ , via Equação 5, apresenta as seguintes melhorias comparadas ao  $G_1$ : (i) para um mesmo tipo de padrão gradiente, o valor de  $G_2$  é invariante ao tamanho da matriz; mais apropriadamente, não considera os elementos da borda da matriz para calcular o gradiente; (iii) pode ser aplicada, sem perda de generalidade, a matrizes retangulares; e (iv) é menos sensível ao ruído de normas e fase que os outros momentos gradiente (ROSA et al., 2018). 2.3.3 Análise de Padrões-Gradiente (GPA) para Séries Temporais

O conceito de simetria para análise em séries temporais, conforme Assireu et al. (2002), é ilustrado na Figura 7 (a), e mostra um perfil totalmente simétrico em relação ao eixo vertical (DANTAS, 2009).

Figura 6 – Metodologia para mapear a série temporal de tamanho N em uma matriz quadrada de ordem  $\sqrt{N} \times \sqrt{N}$ . Neste exemplo temos uma série temporal de 1024 pontos distribuídos em uma matriz.



Fonte: (DANTAS, 2009).

Este perfil simétrico é composto por 100 pontos de modo que a sua matriz quadrada tem o tamanho  $10 \times 10$ ; a Figura 6 demonstra como é feito o mapeamento dos valores da série temporal para o formato de matriz; o padrão gradiente correspondente a esse perfil é mostrado na Figura 7 (f) (DANTAS, 2009).

Levando em consideração um eixo diagonal nesse campo gradiente, pode-se observar que para cada vetor local  $\underline{v}$  da grade vai existir um vetor correspondente  $\underline{-v}$  com o mesmo módulo, mas com fase oposta - denominados vetores simétricos. Assim, se removermos os pares simétricos para quantificar assimetria, ao final da operação, não haverá vetores remanescentes no padrão gradiente (DANTAS, 2009).

A Figura 7 (b) e Figura 7 (c) são exemplos de perfis assimétricos e seus padrões-

Figura 7 – Três exemplos de perfis de amplitudes compostas de 100 pontos, e seus respectivos padrões-gradientes, calculados a partir de matrizes  $10 \times 10$ .



gradiente podem ser visualizados na Figura 7 (e) e Figura 7 (f), respectivamente (DANTAS, 2009).

A Figura 6 demonstra como é realizado o mapeamento da série temporal para a matriz correspondente e o seu respectivo padrão-gradiente; como exemplo, uma série temporal contendo 100 pontos corresponde a uma matriz de tamanho  $10 \times 10$ , onde cada linha da matriz é um grupo de 10 pontos sequenciais da série temporal, tomados da esquerda para a direita (DANTAS, 2009).

Conforme Assireu et al. (2002 apud DANTAS, 2009), os valores de  $G_2$  calculados a partir dessas matrizes não dependem da direção da série temporal como são tomados (da direita para a esquerda ou vice-versa) e são mais robustos do que as técnicas consideradas convencionais, para estudo de padrões de flutuação em séries temporais curtas.

2.3.4 Cálculo do Segundo Momento Gradiente  $(G_2)$  a partir de uma Série Temporal

Todo o processo prático para cálculo do  $G_2$  de séries temporais utiliza o algoritmo de Sautter (2017). Com base na revisão da literatura que apresenta a técnica GPA, na próxima Seção 3 apresenta-se a metodologia adotada para a aplicação do GPA sobre os dados discutidos na Seção 2.1.4.

## 3 METODOLOGIA

Espectrômetros de rádio do tipo CALLISTO distribuídos em vários países observam *flares* solares; estes instrumentos observam automaticamente, seus dados são coletados diariamente via internet e armazenados em um banco de dados central; uma interface *web* existe (<<u>http://www.e-callisto.org/></u>), na qual é possível procurar e baixar dados; os instrumentos formam uma rede chamada e-CALLISTO; ela ainda está crescendo em número de estações, pois é desejável haver redundância para cobertura por 24 horas da radioemissão solar nas bandas métricas; o sistema e-CALLISTO já provou ser uma ferramenta valiosa para monitorar atividade solar e para pesquisas de clima espacial (BENZ et al., 2009).

## 3.1 Dados

No estudo de explosões solares Tipo I foram utilizados neste trabalho os arquivos (FITS) disponíveis no repositório do e-CALLISTO. Esses arquivos FITS foram gerados pelo espectrógrafo BLEN7M, que contém dados da densidade de fluxo de rádio do Sol, na faixa de frequência aproximadamente entre 65 MHz e 865 MHz, porém, para cada um destes arquivos, foi selecionado apenas um canal (167), na frequência de 263,3 MHz, consequentemente sendo obtida uma série temporal de cada arquivo, cada uma com 3600 pontos. Os arquivos foram lidos usando a linguagem de programação Python. As séries analisadas possuem o tamanho  $1 \times 3600$  (1 linha e 3600 colunas) (tamanho total de cada série do arquivo FITS).

Foram selecionadas, para análise, 8 séries temporais contendo dados de explosões solares Tipo I (conforme descritas na Tabela 2), cuja seleção inicial foi feita analisando muitos espectros dinâmicos disponíveis *online* no repositório do e-CALLISTO, e destacando/escolhendo aqueles que tinham maior intensidade e ocorrências de emissões solares Tipo I, baseado no padrão de cadeias de explosões solares Tipo I (*chains of type I bursts*), de acordo com o padrão canônico relatado na literatura (KRÜGER, 1979).

A seleção final foi feita, conforme informações do relatório do dia 30/07/2011 (NOAA, 2011), procurando por eventos do tipo RNS (*Radio Noise Storms*), isto é, Tempestades de Ruído em Rádio, provenientes do sítio eletrônico "Relatórios de Eventos Solares e Geofísicos" (*Solar and Geophysical Event Reports*) do *National Oceanic and Atmospheric Administration* - NOAA (<<u>https://www.swpc.noaa.gov/products</u>/ solar-and-geophysical-event-reports>), com o objetivo de confirmar se os dados selecionados realmente eram relacionados a explosões solares Tipo I.

Desta forma, baseado nos horários dos dados dos arquivos FITS selecionados, conforme informações da Tabela 2, analisando-se o relatório do NOAA do dia 30/07/2011, foi confirmado que, em todos os horários, ocorreram eventos RNS:

 "Evento 820 +", que ocorreu entre 04h58m e 07h32m UTC, confirmando as escolhas dos 5 arquivos FITS referentes aos seguintes horários UTC:

1. Início em 05:45 e término em 06:00 UTC.

- 2. Início em 06:00 e término em 06:15 UTC.
- 3. Início em 06:15 e término em 06:30 UTC.
- 4. Início em 06:30 e término em 06:45 UTC.
- 5. Início em 06:45 e término em 07:00 UTC.

# (MONSTEIN, 2011a; MONSTEIN, 2011c; MONSTEIN, 2011e; MONSTEIN, 2011g; MONS-TEIN, 2011i);

2) "Evento 790 +", que ocorreu entre 09h51m e 12h24m UTC, confirmando as escolhas dos 3 arquivos FITS referentes aos seguintes horários UTC:

- 1. Início em 10:00 e término em 10:15 UTC.
- 2. Início em 11:00 e término em 11:15 UTC.
- 3. Início em 11:45 e término em 12:00 UTC.

## (MONSTEIN, 2011k; MONSTEIN, 2011m; MONSTEIN, 2011o).

Após a seleção, realizou-se uma análise em cada um dos 8 arquivos FITS, com o objetivo de selecionar uma série temporal de cada arquivo, que contivesse a maior média de intensidade, do tempo inicial ao tempo final, entre o intervalo de frequência  $\geq 255$  MHz e  $\leq 285$  MHz, pois a análise visual dos espectros dinâmicos destes arquivos FITS demonstrou que essa faixa continha as emissões com maior intensidade e com padrão mais destacado de RNS, e consequentemente, de emissões solares Tipo I. A partir desta

seleção, verificou-se que, em todos os casos, a frequência que continha a maior média de intensidades, em cada arquivo foi 263,3 MHz, correspondendo ao canal 167. Desta forma, extraíram-se as séries temporais nesta frequência para aplicação dos processamentos.

As plotagens dos espectros dinâmicos (Tempo × Frequência (MHz) × Densidade de Fluxo de Rádio) dos arquivos FITS associados a essas tempestades de ruído e as respectivas plotagens (Tempo (hora) × Intensidade (db)) das 8 séries temporais na frequência 263,3 MHz (Canal 167) podem ser visualizadas desde a Figura 19 até a Figura 34, presentes no Apêndice A.

Com o objetivo de comparar o comportamento destas séries de emissões solares Tipo I, foram selecionadas 8 séries temporais canônicas, conforme Tabela 3, 3 de ruídos 1/f (White Noise, Pink Noise e Red Noise), 3 séries caóticas ("A5\_Chua-Chaos\_Y1", "A6\_Logist" e "A7\_Henon \_x"), e 2 séries turbulentas ("A0\_Turb6mil" e "A8\_PModel").

As plotagens (Posição  $\times$  Amplitude) destas 8 séries temporais canônicas podem ser visualizadas desde a Figura 35 até a Figura 42, também presentes no Apêndice A

As 16 séries utilizadas estão descritas na Tabela 2 e Tabela 3. Estas séries possuem 3600 pontos obtidas do canal 167, frequência de 263,3 MHz, do arquivo FITS que possui dados de radioemissões solares, proveniente do espectrógrafo suíço BLEN7M, e obtido do repositório e-CALLISTO. Todas as séries são do dia 30/07/2011 com duração de 15 minutos.

Tabela 2 – Séries temporais de emissões solares Tipo I selecionadas para as análises via GPA, PSD e DFA.

Série Temporal	Descrição
"BLEN7M_20110730_054503_25"	Gravada entre 05h45m03s até 06h00m UTC (15 minutos de dura-
"BLEN7M_20110730_060002_25"	ção). Gravada entre 06h00m02s até 06h15m UTC (15 minutos de dura- cão).
"BLEN7M_20110730_061502_25"	Gravada entre 06h15m02s até 06h30m UTC (15 minutos de dura- cão).
"BLEN7M_20110730_063002_25"	Gravada entre 06h30m02s até 06h45m UTC (15 minutos de dura- cão)
"BLEN7M_20110730_064502_25"	Gravada entre 06h45m02s até 07h00m UTC (15 minutos de dura- cão).
"BLEN7M_20110730_100002_25"	Gravada entre 10h00m02s até 10h15m UTC (15 minutos de dura- cão)
"BLEN7M_20110730_110003_25"	Gravada entre 11h00m03s até 11h15m UTC (15 minutos de dura- ção)
"BLEN7M_20110730_114500_25"	Gravada entre 11h45m00s até 11h15m UTC (15 minutos de dura- ção).

Fonte: produzida pelo autor.

Série Temporal	Descrição
"White Noise"	Série com 3600 pontos caracterizada pelos ruídos $1/f^{\beta}$ , com $\beta = 0$ . Foi obtida
"Pink Noise"	utilizando-se o codigo em Python "colorednoise.py" de Patzelt (2017). Série com 3600 pontos caracterizada pelos ruídos $1/f^{\beta}$ , com $\beta = 1$ . Foi obtida utilizando-se o código em Python "colorednoise.py" de Patzelt (2017).
"Red Noise"	Série com 3600 pontos caracterizada pelos ruídos $1/f^{\beta}$ , com $\beta = 2$ . Foi obtida utilizando-se o código em Python "colorednoise.py" de Patzelt (2017).
"A0_Turb6mil"	Série com 3600 pontos caracterizada por seu padrão turbulento. Foi obtida de Barchi (2017), originalmente no tamanho de 6001 pontos, posteriormente sendo redimensionada em 3600 pontos, para se adequar ao tamanho das demais séries.
"A5_Chua-Chaos_Y1"	Série com 3600 pontos caracterizada por seu padrão caótico (amplitude Chua- Caótico). Foi obtida de Barchi (2017), originalmente no tamanho de 12000 pontos, posteriormente sendo redimensionada em 3600 pontos, para se adequar ao tamanho das demais séries. Segundo informações provenientes da fonte, o arquivo que gerou estes dados dados16384.mat apresenta as seguintes variáveis: 1) tspan: vetor tempo; 2) y: matriz de 3 colunas (variáveis do Chua) pelo número de dados obtido a partir de RK4; 3) $y_m$ , $y_p$ : descrição idêntica a y, só que obtida a partir da média dos dois modos de arredondamento empregados; 4) $y_0$ : condição inicial. Para obter a série original, a fonte considerou os últimos 12000 pontos referentes à primeira coluna de y (primeira variável do Chua).
"A6_Logist"	Desta forma, foi obtida a série "A5_Chua-Chaos_Chaos_Y1". Série com 3600 pontos caracterizada por seu padrão caótico (amplitude logístico (k = 4). Foi obtida de Barchi (2017), originalmente no tamanho de 12000 pontos, posteriormente sendo redimensionada em 3600 pontos, para se adequar ao tamanho das demais séries. Esta série de amplitude logística foi gerada com $k = 4$ e ponto inicial pequeno ( $A_0 = 0,0001$ ) e demais pontos definidos como $A_{} = kA_4(1-A_4)$
"A7_Henon _x"	Série com 3600 pontos caracterizada por seu padrão caótico (Amplitude Hénon). Foi obtida de Barchi (2017), originalmente no tamanho de 12000 pontos, posteriormente sendo redimensionada em 3600 pontos, para se adequar ao tamanho das demais séries. O mapa de Hénon é um sistema dinâmico com comportamento caótico que tem um ponto $(x_n, y_n)$ no plano e a partir deste mapeia para um novo ponto
	$\begin{cases} x_{n+1} = 1 - ax_n^2 + y_n \\ y_{n+1} = bx_n. \end{cases}$
"A8_PModel"	Para a geração da série original, a fonte utilizou os parâmetros $a = 1,4$ e $b = 0,3$ . Série com 3600 pontos caracterizada por seu padrão turbulento (amplitude p-Model). Foi obtida de Barchi (2017), originalmente no tamanho de 12000 pontos, posteriormente sendo redimensionada em 3600 pontos, para se adequar ao tamanho das demais séries. A série de amplitude p-Model foi gerada pelo algoritmo pmodel.m ( <i>matlab script</i> ), obtido do seguinte sítio eletrônico: <htp: pmodel="" staff="" surrogates="" themes="" venema="" www2.meteo.uni-bonn.de=""></htp:> .

Tabela 3 – Séries temporais canônicas selecionadas para as análises via GPA, PSD e DFA.

Fonte: produzida pelo autor.

Todas as séries temporais de tempestades de ruído (emissões solares Tipo I), descritas na Tabela 2, foram inicialmente tratadas usando um *software* em Python, desenvolvido pelo autor. Este *software* foi nomeado como "manipular\_CALLISTO.py".

O fluxo de funcionamento para retirada de série temporal de um arquivo FITS deste *software* ocorre da seguinte forma:

- 1. Entrada: arquivo FITS;
- 2. **Processamento:** leitura do arquivo FITS e retirada de apenas um canal de frequência, resultando em uma série temporal (na prática, um vetor) de 3600 pontos;
- 3. Saída: arquivo de texto contendo a série temporal extraída.

Antes de iniciar o processamento GPA, processou-se a Densidade Espectral de Energia (*Power Spectral Density* - PSD) e a Análise de Flutuação Destendenciada (*Detrended Fluctuation Analysis* - DFA) das 16 séries temporais. Gerou-se 16 gráficos, cada um deles contendo as plotagens das séries temporais e das análises PSD e DFA de cada uma das séries temporais de ruídos canônicos e das séries de emissões solares Tipo I. Não foi realizada normalização nas séries temporais, pois a normalização dos dados não afeta o GPA (principal técnica utilizada neste trabalho).

# 3.2 Processamento do PSD e DFA

Para o processamento do PSD e DFA às 16 séries temporais descritas na Tabela 2 e Tabela 3, utilizou-se um *software* obtido de Zeferino (2017a), escrito na linguagem de programação Python, que plota a Posição × Amplitude da série temporal, e processa o PSD e DFA da série (ZEFERINO, 2017b).

Antes do processamento processamento do PSD (que utiliza a FFT) e DFA, todas as séries foram redimensionadas de 3600 pontos para 2048 ( $2^{11}$ ) pontos (foram mantidos apenas os 2048 pontos iniciais).

- 1. Entrada: arquivo de texto contendo a série temporal. Exemplo: "serie.txt";
- 2. Processamento: plota a Posição × Amplitude, o PSD e DFA da série temporal;

 Saída: 1 figura contendo 3 gráficos: 1) plotagem da Posição × Amplitude da série temporal; 2) plotagem do PSD da série temporal; 3) plotagem do DFA da série temporal.

Assim, obteve-se os respectivos gráficos, conforme apresentados na Seção 4.

### 3.3 Processamento do Espectro Gradiente (GPA)

Para o processamento que calcula o Espectro Gradiente, utilizou-se um *software* que processa a técnica. Este *software* utiliza as linguagens de programação Cython e Python, e foi baixado na página do GitHub do desenvolvedor Sautter (2017). É importante destacar que este *software* utilizado na dissertação foi baixado em meados de julho de 2017, e desde esta data, o mesmo vêm sofrendo diversas atualizações até a data de hoje, portanto os cálculos podem ter sido aprimorados, e desta forma, não se adequarem aos mesmos resultados obtidos neste trabalho, por ter sido usado uma versão mais antiga (2017).

Para trabalhar com *softwares* escritos na linguagem de programação Python, é necessário que o ambiente Python esteja instalado no computador. O autor utilizou a plataforma de ciência de dados para Python "Anaconda", de Anaconda (2018), e o ambiente de desenvolvimento "PyCharm", de JetBrains (2018). O autor estuda disponibilizar publicamente na Internet os *softwares* implementados, apesar da exposição, a seguir, dos detalhes relativos aos fluxos de funcionamento de cada *software*.

Para a execução do código que processa o GPA, é necessário apenas compilar e executar o código-fonte "main.py", seguindo as instruções contidas na página inicial do GitHub *software* do desenvolvedor, conforme Sautter (2017).

O comando para invocar o código em Python é *python main.py filename tol rad\_tol ptol.* O parâmetro "filename" pede como entrada uma matriz de dados; o parâmetro "tol" pede como entrada o valor real do módulo vetorial, o parâmetro "rad\_tol" pede como entrada o valor real da tolerância da fase, e o parâmetro "ptol" pede como entrada o valor da tolerância da fase, e o parâmetro "ptol" pede como entrada o valor da tolerância da fase, e o parâmetro "ptol" pede como entrada o valor da tolerância da posição. Para realizar os processamentos utilizados neste trabalho, usou-se os valores 0,02; 0,01 e 1 para os parâmetros "tol", "rad\_tol" e "ptol", respectivamente.

Para executar o código "main.py", é necessário inserir uma matriz de dados como dado de entrada. Para a produção desta entrada, serão descritos a seguir os 2 *softwares* 

implementados pelo autor, que, após serem processados, permitem que seja retornada uma matriz de dados. Esta matriz de dados será sempre uma série temporal (completa ou parcial, no caso de ser uma escala da série) de explosões solares Tipo I, ou uma das 8 séries temporais canônicas.

Os 2 *softwares* implementados em Python, que realizam a conversão da série temporal em uma matriz, e convertem uma matriz em mini matrizes são, respectivamente:

- 1. "converte\_serie\_em\_matriz.py";
- 2. "converte\_matriz\_em\_mini\_matrizes.py"

O *software* "converte\_serie\_em\_matriz.py", primeiro a ser utilizado, tem o seguinte fluxo de funcionamento:

- 1. Entrada: arquivo de texto contendo a série temporal. Exemplo: "serie.txt";
- Processamento: conversão da série em uma matriz quadrada, contendo todos os seus pontos;
- Saída: arquivo de texto contendo a série temporal convertida em matriz. Exemplo: "matriz.txt".

Executou-se o *software* "converte\_serie\_em\_matriz.py" para as 16 séries temporais. Todas as saídas serão matrizes de tamanho  $60 \times 60$  (3600 pontos).

O *software* "converte\_matriz\_em\_mini\_matriz.py", tem o seguinte fluxo de funcionamento:

- 1. Entrada: arquivo de texto contendo a matriz de dados. Exemplo: "matriz.txt";
- 2. Processamento: conversão da matriz em um "array de matrizes", na escala desejada. Exemplo: o número de pontos das séries é de 3600. A matriz quadrada é de ordem 60 ( $60 \times 60$ ). Ao converter esta matriz para a escala L5, serão criadas 25 matrizes de ordem 12 ( $12 \times 12$ ). Este processamento ocorre em um laço, até o número da ordem da matriz que se deseja converter. Para cada "mini matriz" analisada, gera-se L1/LN valores de  $G_2$ , onde LN é a escala que se deseja trabalhar (no caso, de L1 a L11);

3. Saída: média e desvio padrão do G<sub>2</sub> das "mini matrizes" analisadas, para cada escala (L1 a L11). Caso a matriz seja de ordem 60, o resultado do G<sub>2</sub> será "direto" não havendo média, nem desvio padrão. Exemplo dos arquivos de texto gerados: 1) "media\_G<sub>2</sub>\_PN\_L3.txt"; e 2) "desvio\_padrao\_G<sub>2</sub>\_PN\_L3.txt".

A motivação para o cálculo com as mini matrizes (escalas L2 a L11) provêm de uma necessidade de análise via GPA mais acurada dos mesmos valores existentes na matriz L1, mas em diferentes escalas (níveis de acurácia), de forma inédita, com a possibilidade de comparação entre estes resultados.

Com o objetivo de preservar a dependência temporal dos pontos adjacentes nas séries temporais mesmo nas escalas menores, o mapeamento dos valores das séries temporais para o formato de matriz feito por intermédio da conversão das matrizes L1 para as diferentes escalas L de mini matrizes, foi realizado conforme os trabalhos de Assireu et al. (2002) e Dantas (2009).

Ressalta-se, que não foi realizado conforme o mapeamento utilizado por Cintra, Fernandes e Rosa (2017), uma vez que está técnica ainda necessita ser consolidada, em cujo mapeamento de matriz para mini matrizes, as mini matrizes são retiradas via "cortes" das regiões da matriz.

Executou-se o software "converte\_matriz\_em\_mini\_matriz.py" para as matrizes de dados relativas a 16 séries temporais, descritas na Tabela 2 e Tabela 3, configurando a escala desejada (L1 a L11) a cada execução. Ele realiza o mapeamento da matriz para a escala de matriz desejada (L2 a L11) e também processa o GPA para cada matriz, calculando-se, ao final do processamento em cada escala, o valor do  $G_2$  para a escala L1, e a média dos valores de  $G_2$  para as escalas de L2 a L11; também calcula-se os desvios padrão associados a estas médias.

Processou-se as 16 séries temporais (descritas na Tabela 2 e Tabela 3) utilizando a técnica GPA, computando apenas o Segundo Momento Gradiente ( $G_2$ ), usando-se o software de Sautter (2017). Para este processamento, primeiramente foi necessário realizar alguns ajustes na série temporal, pois como o GPA só consegue realizar o processamento em matrizes quadradas, é necessário converter este vetor em pelo menos uma matriz quadrada. Como a intenção também é processar esta série em várias escalas de matrizes quadradas, de forma inédita, com o intuito de verificar se esta análise mais acurada produz resultados interessantes e distintos da análise apenas utilizando o tamanho total de pontos (L1), converteu-se este vetor (a série) em várias escalas de matrizes quadradas (L1 =  $60 \times 60 - 3600$  pontos; L2 =  $30 \times 30 - 900$  pontos; L3 =  $20 \times 20 - 400$  pontos; L4 =  $15 \times 15 - 225$  pontos; L5 =  $12 \times 12 - 144$  pontos; L6 =  $10 \times 10 - 100$  pontos; L7 =  $6 \times 6 - 36$  pontos; L8 =  $5 \times 5 - 25$  pontos; L9 =  $4 \times 4 - 16$  pontos; L10 =  $3 \times 3 - 9$  pontos; L11 =  $2 \times 2 - 4$  pontos). O programa utilizado para realizar essas conversões de escalas é de própria autoria.

Como exemplo, considerando a escala  $L1 = 4 \times 4$  - 16 pontos, e a escala  $L2 = 2 \times 2$  - 4 pontos, o mapeamento é realizado segundo a Equação 6 (exemplo de matriz de escala L1) e a Equação 7 (exemplos de 1<sup>a</sup>, 2<sup>a</sup>, 3<sup>a</sup> e 4 mini matrizes, respectivamente das escalas L2, L3, L4 e L5).

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 5 & 6 & 7 & 8 \\ 9 & 10 & 11 & 12 \\ 13 & 14 & 15 & 16 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 5 & 6 \\ 7 & 8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 9 & 10 \\ 11 & 12 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 13 & 14 \\ 15 & 16 \end{bmatrix}$$
(6)
(7)

Para cada processamento realizado nessas escalas, o GPA gera um valor chamado de Momento Gradiente, mais especificamente o Segundo Momento Gradiente ( $G_2$ ), pois calculou-se apenas o Segundo Momento Gradiente.

Todas as 16 séries analisadas foram convertidas em matrizes nas escalas variando de L1 a L11, citadas anteriormente. A partir dos valores de  $G_2$  gerados das 11 escalas de matrizes, da série temporal de emissões solares, conforme Tabela 2, e das 8 séries temporais canônicas, conforme Tabela 3, produziu-se um gráfico Log  $1/L \times G_2$  contendo todos esses resultados. Os detalhes serão expostos a seguir. A partir da visualização deste gráfico é possível verificar os valores de  $G_2$  das séries temporais analisadas, para cada escala.

Após os processamentos realizados, outro *software* desenvolvido pelo autor foi utilizado para realizar a plotagem do gráfico Log  $1/L \times G_2$ , utilizando os valores de  $G_2$  e desvios padrão para cada escala L. O software "plotar\_grafico.py", tem o seguinte fluxo de funcionamento:

- Entrada: para a plotagem dos valores do eixo X, utilizou-se os valores das escalas de L1 a L11; para a plotagem dos valores do eixo Y, utilizou-se os valores das médias dos valores de G<sub>2</sub>, contendo os desvios padrão, conforme arquivos de saída detalhados nos itens relativos à explicação da execução do software "converte\_matriz\_em\_mini\_matriz.py";
- 2. Processamento: criação do gráfico a partir dos dados de entrada;
- 3. Saída: gráfico Log  $1/L \times G_2$ .

A síntese para a obtenção do Espectro Gradiente pode ser visualizada na Figura 8: Figura 8 – Diagrama explicativo referente à obtenção do Espectro Gradiente.



Fonte: produzida pelo autor.

# **4 ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS**

Nesta Seção serão analisados e interpretados os resultados referentes aos processamentos do Espectro Gradiente (GPA), PSD e DFA.

# 4.1 Resultados do Espectro Gradiente (GPA)

A aplicação da técnica GPA sobre séries temporais de ruídos do tipo 1/f e em série de emissão solar Tipo I já foi realizada em Cintra, Fernandes e Rosa (2017), porém com metodologia diferente da conversão de séries temporais em matrizes, adotada em Assireu et al. (2002) e Dantas (2009).

Portanto, nesta dissertação, a aplicação inédita da técnica GPA sobre as 16 séries temporais analisadas, descritas na Seção 3, sendo 8 séries temporais de radioemissões solares, especificamente de dados contendo emissões solares Tipo I, e 8 séries canônicas (3 ruídos 1/f, 2 turbulentas e 3 caóticas) conforme a metodologia de Assireu et al. (2002) para conversão de séries temporais em matrizes, obteve os resultados conforme os gráficos Log 1/L ×  $G_2$ , exibidos na Figura 9 e Figura 10, obtidos a partir do processamento do *software* "converte\_serie\_em\_matriz.py", considerando as respectivas barras de erro (desvios padrão) para cada escala analisada (L1 a L11).

### 4.1.1 Discussão dos Resultados do Processamento do GPA

Os resultados dos processamentos exibidos na Figura 9 e Figura 10 podem ser visualizados na Tabela 4. Os resultados foram arrendondados para 3 casas decimais. O canal das séries temporais de emissões solares Tipo I (BLEN7M) é 167.

Na Figura 11 pode-se observar uma análise via GPA de 4 séries temporais (1 série de emissão solar Tipo I + 3 séries de ruídos canônicos), com fitagem via Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) das partes positivas (L1 a L8) e negativas (L8 a L11), para escalas de L1 a L11.

Figura 9 – Gráficos Log  $1/L \times G_2$ . Análise via GPA de 9 séries temporais (1 série de emissão solar Tipo I em cada gráfico + 8 séries de ruídos canônicos em cada gráfico), para escalas de L1 a L11.



Fonte: produzida pelo autor.





Fonte: produzida pelo autor.

Série Temporal	$G_2$ -L1	Média	Média	Média	Média	Média	Média	Média	Média	Média	Média
		$G_2$ -L2	$G_2$ -L3	$G_2$ -L4	$G_2$ -L5	$G_2$ -L6	$G_2$ -L7	$G_2$ -L8	$G_2$ -L9	$G_2$ -L10	$G_2$ -L11
		$\pm DP$	$\pm DP$	$\pm DP$	$\pm DP$	$\pm DP$	$\pm DP$	$\pm DP$	$\pm DP$	$\pm DP$	$\pm \text{DP}$
1. 'BLEN7M 20110730 054503 25"	0,223	0.327	0.370	0.417	0.453	0.493	0.589	0.603	0,580	0.549	0.388
	,	$\pm 0,083$	$\pm 0,081$	$\pm 0,094$	$\pm 0,139$	$\pm 0,151$	$\pm 0,226$	$\pm 0,248$	$\pm 0,250$	$\pm$ 0,337	$\pm$ 0,431
2. "BLEN7M_20110730_060002_25"	0,365	$0,\!459$	0,554	0,555	0,610	$0,\!614$	0,696	0,716	0,678	$0,\!647$	0,455
		$\pm 0,085$	$\pm 0,169$	$\pm 0,176$	$\pm 0232$	$\pm 0,263$	$\pm 0,295$	$\pm 0,333$	$\pm 0,335$	$\pm 0,401$	$\pm 0,465$
3. "BLEN7M_20110730_061502_25"	0,413	0,492	0,559	$0,\!651$	$0,\!677$	$0,\!682$	0,750	0,759	0,722	0,669	0,468
		$\pm 0,331$	$\pm 0,302$	$\pm 0,352$	$\pm 0,330$	$\pm 0,329$	$\pm 0,313$	$\pm$ 0,335	$\pm 0,374$	$\pm 0,397$	$\pm 0,487$
4. "BLEN7M_20110730_063002_25"	0,486	$0,\!610$	$0,\!647$	0,725	0,773	0,772	0,843	0,838	0,777	0,719	0,512
		$\pm$ 0,131	$\pm$ 0,205	$\pm$ 0,208	$\pm$ 0,232	$\pm$ 0,259	$\pm$ 0,313	$\pm$ 0,292	$\pm$ 0,344	$\pm$ 0,394	$\pm 0,481$
5. "BLEN7M_20110730_064502_25"	0,381	$0,\!482$	0,565	$0,\!620$	$0,\!647$	$0,\!684$	0,732	$0,\!699$	$0,\!688$	$0,\!623$	0,460
		$\pm$ 0,072	$\pm$ 0,193	$\pm$ 0,215	$\pm$ 0,237	$\pm$ 0,244	$\pm$ 0,328	$\pm$ 0,298	$\pm$ 0,350	$\pm$ 0,398	$\pm$ 0,467
6. "BLEN7M_20110730_100002_25"	0,396	0,566	$0,\!654$	0,666	0,755	0,773	0,853	0,819	0,811	0,733	0,558
		$\pm$ 0,028	$\pm$ 0,093	$\pm$ 0,137	$\pm$ 0,147	$\pm$ 0,165	$\pm$ 0,245	$\pm$ 0,248	$\pm$ 0,317	$\pm$ 0,352	$\pm 0,\!488$
7. "BLEN7M_20110730_110003_25"	0,495	$0,\!580$	$0,\!613$	$0,\!697$	0,726	0,770	0,806	0,831	0,842	0,748	0,580
		$\pm$ 0,156	$\pm$ 0,185	$\pm$ 0,266	$\pm$ 0,245	$\pm$ 0,257	$\pm$ 0,291	$\pm$ 0,328	$\pm$ 0,322	$\pm$ 0,394	$\pm 0,508$
8. "BLEN7M_20110730_114500_25"	0,520	$0,\!649$	$0,\!647$	$0,\!699$	0,727	0,816	0,790	0,754	0,748	$0,\!671$	0,504
		$\pm$ 0,182	$\pm$ 0,200	$\pm$ 0,280	$\pm$ 0,284	$\pm$ 0,319	$\pm$ 0,359	$\pm$ 0,361	$\pm$ 0,387	$\pm$ 0,414	$\pm 0,481$
9. "White Noise"	1,672	1,806	1,845	$1,\!879$	1,880	1,865	1,810	1,786	1,701	$1,\!656$	1,244
		$\pm$ 0,046	$\pm$ 0,030	$\pm$ 0,040	$\pm$ 0,036	$\pm$ 0,062	$\pm$ 0,099	$\pm$ 0,110	$\pm$ 0,153	$\pm$ 0,180	$\pm 0,253$
10. "Pink Noise"	1,562	1,733	1,824	1,793	1,783	1,810	1,722	1,717	$1,\!624$	1,533	1,246
		$\pm$ 0,083	$\pm$ 0,039	$\pm$ 0,067	$\pm$ 0,095	$\pm$ 0,131	$\pm$ 0,165	$\pm$ 0,166	$\pm$ 0,181	$\pm$ 0,222	$\pm 0,260$
11. "Red Noise"	1,234	$1,\!424$	1,491	$1,\!637$	1,545	1,530	$1,\!470$	$1,\!480$	$1,\!420$	$1,\!374$	1,197
		$\pm$ 0,102	$\pm 0,165$	$\pm 0,225$	$\pm 0,234$	$\pm 0,240$	$\pm 0,284$	$\pm$ 0,267	$\pm 0,274$	$\pm 0,273$	$\pm 0,244$
12. "A0_Turb6mil"	1,162	$1,\!330$	1,422	1,382	1,407	1,408	1,366	$1,\!293$	$1,\!284$	1,229	0,958
		$\pm$ 0,052	$\pm 0,106$	$\pm 0,\!170$	$\pm$ 0,165	$\pm$ 0,212	$\pm 0,220$	$\pm 0,244$	$\pm 0,238$	$\pm$ 0,300	$\pm 0,431$
13. "A5_Chua-Chaos_Y1"	0,784	0,756	$0,\!695$	$0,\!845$	0,813	0,957	$1,\!131$	$1,\!119$	1,102	1,039	1,029
		$\pm 0,072$	$\pm 0,221$	$\pm 0,236$	$\pm 0,193$	$\pm 0,295$	$\pm 0,184$	$\pm 0,233$	$\pm 0,218$	$\pm 0,131$	$\pm 0,119$
14. "A6_Logist"	1,732	$1,\!840$	1,880	1,856	1,878	1,873	1,816	1,791	1,715	1,605	1,208
		$\pm 0,008$	$\pm 0,020$	$\pm 0,049$	$\pm 0,054$	$\pm 0,055$	$\pm 0,105$	$\pm 0,119$	$\pm 0,168$	$\pm 0,254$	$\pm 0,254$
15. "A7_Henon $x$ "	1,737	1,836	1,863	1,853	1,886	1,884	1,821	1,826	$1,\!653$	1,747	1,149
		$\pm 0,019$	$\pm 0,040$	$\pm 0,047$	$\pm 0,052$	$\pm 0,045$	$\pm 0,111$	$\pm 0,090$	$\pm 0,188$	$\pm 0,153$	$\pm 0,188$
16. "A8_PModel"	0,656	0,859	0,946	0,966	1,029	1,012	1,069	0,988	1,032	0,937	0,784
		$\pm$ 0,052	$\pm$ 0,079	$\pm$ 0,109	$\pm$ 0,078	$\pm$ 0,116	$\pm$ 0,163	$\pm$ 0,194	$\pm$ 0,258	$\pm$ 0,275	$\pm$ 0,232

Tabela 4 – Resultados do Processamento do  $G_2$  (Segundo Momento Gradiente) das 8 séries temporais de emissões solares Tipo I e das 8 séries temporais canônicas.

Fonte: produzida pelo autor.

Figura 11 – Gráfico Log  $1/L \times G_2$ . Análise via GPA de 4 séries temporais (1 série de emissão solar Tipo I + 3 séries de ruídos canônicos), com fitagem MMQ das partes positivas (L1 a L8) e negativas (L8 a L11), para escalas de L1 a L11.



Fonte: produzida pelo autor.

Analisando-se os resultados quanto às similaridades de valores de  $G_2$ , verifica-se que:

 O grupo contendo as séries "White Noise" e "Pink Noise", "A6\_Logist" e "A7\_Henon \_x" tem valores de G<sub>2</sub> próximos na maioria das escalas, conforme verifica-se na Figura 12.

Figura 12 – Gráfico Log 1/L ×  $G_2$ . Análise via GPA das séries "A6\_Logist", "A7\_Henon \_x", "White Noise" e "Pink Noise".



Fonte: produzida pelo autor.

 As séries "Red Noise" e "A0\_Turb6mil" podem ser incluídas em um segundo grupo, pois possui valores de G<sub>2</sub> próximos na maioria das escalas, conforme verifica-se na Figura 13;

Figura 13 – Gráfico Log 1/L ×  $G_2$ . Análise via GPA das séries "Red Noise" e "A0\_Turb6mil".



Fonte: produzida pelo autor.

3. As séries "A5\_Chua-Chaos\_Y1" e "A8\_PModel" podem ser incluídas em um terceiro grupo, pois possuem valores de G<sub>2</sub> próximos na maioria das escalas; além disso, estas duas séries (principalmente a "A5\_Chua-Chaos\_Y1", e considerando valores inclusos dentro das barras de erros dos desvios padrão) são as que mais se aproximam das 8 séries de tempestades de ruído solares, conforme verifica-se na Figura 14 (cada uma destas séries é analisada, individualmente, em cada um dos 8 Gráficos (Figura 9 e Figura 10)). Os casos em que mais se aproximam são nas análises das séries "BLEN7M\_20110730\_063002\_25" (item d)) - Figura 9, "BLEN7M\_20110730\_100002\_25" (item f)) - Figura 10, "BLEN7M\_20110730\_110003\_25" (item g)) - Figura 10 e "BLEN7M\_20110730\_114500\_25" (item h)) - Figura 10, todas no canal 167. Esta semelhança ocorre em todos os casos, para algumas escalas.

Deste modo, as séries podem ser diferenciadas, de forma geral, separando-as nestes 3 grupos de séries que possuem, em cada um deles, séries com comportamentos mais similares.



Figura 14 – Gráfico Log  $1/L \times G_2$ . Análise via GPA das 8 séries de tempestades de ruído solares e das séries canônicas "A5\_Chua-Chaos\_Y1" e "A8\_PModel".

Fonte: produzida pelo autor.

Observa-se que a medida que se muda de escala (L1 a L11) os valores de  $G_2$ , na maioria das séries, tendem a ter maiores desvios padrão, caso mais evidente na escala L11.

Pode-se verificar, quanto à mudança de regime das séries mais semelhantes, que:

- Dentre as séries do primeiro grupo, as 4 séries possuem um regime muito similar até a escala L10, quando a série "A7\_Henon \_x" se afasta das demais seguindo um valor de G<sub>2</sub> mais alto, porém depois se asemelha novamente ficando próxima novamente das demais séries do grupo;
- 2. As 2 séries do segundo grupo possuem um regime muito similar até a escala L4, quando a série "Red Noise" se afasta da série "A0\_Turb6mil" seguindo um valor de G<sub>2</sub> mais alto, mas depois a partir da escala L5 se assemelha novamente ao regime da série "Red Noise"; as duas se distanciam de maneira mais expressiva na escala L11;
- 3. Dentre as séries do terceiro grupo ("A5\_Chua-Chaos\_Y1", "A8\_PModel"), observase que o regime das duas já são diferentes entre as escalas L1 e L3, se assemelhando apenas na escala L4. Se diferenciam novamente nas escalas L5, se assemelhando novamente na escala L6. Entre as escalas L6 e L10, possuem regimes similares, se afastando somente na escala L11; como estas duas séries são as que mais se aproximam das séries de emissões solares Tipo I (em cada um dos gráficos), principalmente a série "A5\_Chua-Chaos\_Y1", e na maioria dos casos, até a escala L5 (principalmente

nas análises das séries de emissões solares Tipo I em que, em algumas escalas, tem valores de  $G_2$  mais próximos destas séries, conforme descrito anteriormente).

As implicações destas características evidenciadas nos casos de similaridades entre os valores de  $G_2$  das séries, no provável contexto físico da geração das tempestades de ruído são que as séries "A5\_Chua-Chaos\_Y1", "A8\_PModel" merecem um estudo comparativo mais aprofundado entre séries temporais canônicas e séries temporais de emissões solares Tipo I, pois apresentaram características próximas às séries temporais solares. Sugerese que sejam analisadas outras séries temporais canônicas com características similares às das séries "A5\_Chua-Chaos\_Y1", "A8\_PModel", ou até mesmo seja estudada a possível hibridização entre essas duas séries, podendo se assemelharem mais, a partir da hibridização, das séries de emissões solares Tipo I. Também sugere-se que seja aumentado o número de amostras de séries temporais de emissões solares Tipo I com o objetivo de verificar se o comportamento de similaridade entre estas 2 séries canônicas, uma turbulenta ("A8\_PModel") e outra caótica ("A5\_Chua-Chaos\_Y1"), com as 8 séries de tempestades de ruído solares, se repetirá.

### 4.2 Resultados do Processamento do PSD e DFA

Aplicou-se o PSD e DFA sobre as 16 séries temporais analisadas, descritas na Seção 3, sendo 8 séries temporais de radioemissões solares, especificamente de dados contendo tempestades de ruído (sequências de emissões solares Tipo I), e 8 séries canônicas (3 ruídos 1/f, 2 turbulentas e 3 caóticas), obtendo-se os resultados conforme a seguir:

- Visualização das 8 séries temporais de emissões solares Tipo I (Tempo (hora) × Amplitude) - Figura 20, Figura 22, Figura 24, Figura 26, Figura 28, Figura 30, Figura 32 e Figura 34;
- Visualização das 8 séries temporais canônicas (Tempo (hora) × Amplitude) Figura 35, Figura 36, Figura 37, Figura 38, Figura 39, Figura 40, Figura 41 e Figura 42;
- 3. DFA  $(\log_{10}(s) \times \log_{10} F(s))$  das 8 séries temporais de emissões solares Tipo I -Figura 15;
- 4. DFA  $(\log_{10}(s) \times \log_{10} F(s))$  das 8 séries temporais canônicas Figura 16;
- 5. PSD (Frequência (Hz)  $\times$  Potência) da 8 séries temporais de emissões solares Tipo I Figura 17;
- 6. PSD (Frequência (Hz)  $\times$  Potência) da 8 séries temporais canônicas Figura 18.

Continua na Seção 4.2.1.



Figura 15 – Gráficos do processamento DFA das 8 séries temporais de emissões solares Tipo I.

Fonte: produzida pelo autor a partir dos dados de Monstein (2011a), Monstein (2011c), Monstein (2011e), Monstein (2011g), Monstein (2011i), Monstein (2011k), Monstein (2011m), Monstein (2011o) e utilizando, para plotagem, o *software* de Zeferino (2017a) (ZEFERINO, 2017b).



Figura 16 – Gráficos do processamento DFA das 8 séries temporais canônicas.

Fonte: produzida pelo autor a partir dos dados de Barchi (2017) e utilizando, para plotagem, o *software* de Zeferino (2017a) (ZEFERINO, 2017b).



Figura 17 – Gráficos do processamento PSD das 8 séries temporais de emissões solares Tipo I.

Fonte: produzida pelo autor a partir dos dados de Monstein (2011a), Monstein (2011c), Monstein (2011e), Monstein (2011g), Monstein (2011i), Monstein (2011k), Monstein (2011m), Monstein (2011o) e utilizando, para plotagem, o *software* de Zeferino (2017a) (ZEFERINO, 2017b).



Figura 18 – Gráficos do processamento PSD das 8 séries temporais canônicas.

Fonte: produzida pelo autor a partir dos dados de Barchi (2017) e utilizando, para plotagem, o *software* de Zeferino (2017a) (ZEFERINO, 2017b).

#### 4.2.1 Discussão dos Resultados do Processamento do PSD e DFA

Os resultados dos processamentos exibidos desde a Figura 15 até a Figura 18 podem

ser visualizados na Tabela 5.

Tabela 5 – Resultados do Processamento do PSD e DFA das 8 séries temporais de emissões solares Tipo I e das 8 séries temporais canônicas.

Série Temporal	PSD	DFA
1. 'BLEN7M_20110730_054503_25" - Canal 167, 263,3 MHz	-0,8103	1,0689
2. "BLEN7M_20110730_060002_25" - Canal 167, 263,3 MHz	-0,8519	1,0374
3. "BLEN7M_20110730_061502_25" - Canal 167, 263,3 MHz	-0,7300	0,9192
4. "BLEN7M_20110730_063002_25" - Canal 167, 263,3 MHz	-0,8624	0,9890
5. "BLEN7M_20110730_064502_25" - Canal 167, 263,3 MHz	-0,9504	0,9452
6. "BLEN7M_20110730_100002_25" - Canal 167, 263,3 MHz	-0,8643	0,9382
7. "BLEN7M_20110730_110003_25" - Canal 167, 263,3 MHz	-1,0573	1,0728
8. "BLEN7M_20110730_114500_25" - Canal 167, 263,3 MHz	-1,0070	1,0520
9. "White Noise"	-0,0442	0,4946
10. "Pink Noise"	-0,9360	0,9676
11. "Red Noise"	-2,0155	1,4715
12. "A0_Turb6mil"	-1,6108	1,2163
13. "A5_Chua-Chaos_Y1"	-5,4757	1,4473
14. "A6_Logist"	0,0231	0,5031
15. "A7_Henon _x"	0,4894	0,3041
16. "A8_PModel"	-0,7478	0,9101

Fonte: produzida pelo autor.

Sugere-se processar o desvio padrão das séries temporais acima utilizando o *software* de Zeferino (2017a).

Como o principal objetivo desta dissertação é a análise de radioemissões solares via GPA, especificamente de emissões solares Tipo I, comparando-as com séries temporais canônicas, para verificar possíveis similaridades, e considerando as discussões dos resultados desta análise, estabelecidas na Seção 4.1.1, onde verificou-se que as séries mais semelhantes às séries temporais de emissões solares Tipo I foram 2 séries canônicas, uma turbulenta ("A8\_PModel") e outra caótica ("A5\_Chua-Chaos\_Y1"), as discussões que serão realizadas nesta Seção 4.2.1 destacarão as comparações entre os resultados contidos desde a Figura 15 até a Figura 18, referentes às 8 séries temporais de emissões solares Tipo I, e das séries "A8 PModel" e "A5 Chua-Chaos Y1".

- Calculando-se a média do PSD das 8 séries de emissões solares Tipo I, obtêm-se o valor −0,8917;
  - a) Calculando-se a média do PSD das séries de emissões solares Tipo

I que mais se aproximaram das séries "A8\_PModel" e "A5\_Chua-Chaos\_Y1", 4 séries, sendo as seguintes: "BLEN7M\_20110730\_063002\_25", "BLEN7M\_20110730\_100002\_25", "BLEN7M\_20110730\_110003\_25" e "BLEN7M\_20110730\_114500\_25", obtêm se o valor -0,94775;

- Calculando-se a média do DFA das 8 séries de emissões solares Tipo I, obtêm se o valor 1.0028375;
  - a) Calculando-se a média do DFA das séries de emissões solares Tipo I que mais se aproximaram das séries "A8\_PModel" e "A5\_Chua-Chaos\_Y1", 4 séries, sendo as seguintes: "BLEN7M\_20110730\_063002\_25", "BLEN7M\_20110730\_100002\_25", "BLEN7M\_20110730\_110003\_25" e "BLEN7M\_20110730\_114500\_25", obtêm se o valor 1,013;

Verifica-se que a série temporal canônica que possui o valor PSD mais próximo, tanto do valor encontrado no item 1., quanto do valor encontrado no item 1. a), é a série Pink Noise, a qual possui o valor -0,9360, e o segundo valor PSD mais próximo, tanto do valor encontrado no item 1., quanto do valor encontrado no item 1. a), é a série "A8\_PModel", a qual possui o valor -0,7478. Os valores PSD e DFA, respectivamente, da série "A5\_Chua-Chaos\_Y1" são -5,4757 e 1,4473.

Quanto às comparações relativas ao valor DFA, verifica-se que a série temporal canônica que possui o valor DFA mais próximo, tanto do valor encontrado no item 2., quanto do valor encontrado no item 2. a), é a série Pink Noise, a qual possui o valor 0,9676, e o segundo valor DFA mais próximo, tanto do valor encontrado no tem 2., quanto do valor encontrado no item 2. a), é a série "A8\_PModel", a qual possui o valor 0,9101.

Assim sendo:

- 1. Considerando-se que os valores de  $G_2$  da série Pink Noise estão muito distantes de todos os valores de  $G_2$  das séries temporais de emissões solares Tipo I;
- Observando-se que os valores de G<sub>2</sub> da série "A8\_PModel" (e da "A5\_Chua-Chaos\_Y1") são os que mais se aproximam dos valores de G<sub>2</sub> das séries temporais de emissões solares Tipo I;

- 3. Tendo em vista que, segundo Assireu et al. (2002) a análise via GPA é mais efetiva para séries curtas (até 10<sup>4</sup> pontos), e que as análises deste estudo utilizaram séries curtas (3600 pontos para a análise via GPA, e 2048 pontos para as análises via PSD e DFA);
- 4. Observando-se que a série "A5\_Chua-Chaos\_Y1" obteve valores de G<sub>2</sub> próximos aos das séries temporais de emissões solares Tipo I, porém obteve valores PSD e DFA distantes destes valores relacionados às séries temporais de emissões solares Tipo I;
- 5. Visto que, considerando as análises da série "A8\_PModel", tanto na análise via GPA, quanto na análise via PSD e DFA, os respectivos valores destas análises são, simultaneamente, os mais próximos dos mesmos valores relacionados às séries temporais de emissões solares Tipo I;
- 6. Considerando-se que houve discrepância entre os resultados observados nas análises da série Pink Noise e das séries temporais de emissões solares Tipo I, pois comparandose os valores PSD e DFA, obteve-se, dentre as séries canônicas, os valores mais próximos, e em contrapartida, comparando-se os valores de  $G_2$ , obteve-se valores muito distantes;
- 7. A série temporal que possui valores de  $G_2$ , PSD e DFA mais próximos dos valores das séries temporais de emissões solares Tipo I é a série "A8\_PModel";
- 8. Conclui-se que, deve-se destacar os valores PSD e DFA da série "A8\_PModel", como sendo os que mais se assemelham aos valores das séries temporais de emissões solares Tipo I, pois considerando a justificativa dada no item 7), apresenta, dentre todas as séries temporais canônicas, valores do PSD, DFA e também dos G<sub>2</sub> mais próximos comparados aos mesmos valores das séries temporais de tempestades de ruído Tipo I.

## 5 CONCLUSÕES

Neste trabalho realizou-se a análise de séries temporais canônicas (ruídos 1/f, turbulentas e caóticas) e emissões solares a partir da aplicação do GPA (principalmente), PSD e DFA.

Para isso, adotou-se a metodologia de Assireu et al. (2002) para realizar o processamento do GPA de 16 séries temporais (8 séries temporais de emissões solares Tipo I, obtidas do repositório de radioemissões solares e-CALLISTO (MONSTEIN, 2011a; MONSTEIN, 2011c; MONSTEIN, 2011e; MONSTEIN, 2011g; MONSTEIN, 2011i; MONSTEIN, 2011k; MONSTEIN, 2011m; MONSTEIN, 2011o) e 8 séries temporais canônicas: 3 ruídos 1/f (*White Noise, Pink Noise e Red Noise*) gerados via *software* de Patzelt (2017) e 5 séries, dentre turbulentas (2) e caóticas (3), obtidas de Barchi (2017)), a partir do mapeamento destas em matrizes quadradas (obrigatório) para, posteriormente, utilizando o algoritmo do GPA de Sautter (2017), processar o Segundo Momento Gradiente ( $G_2$ ) (ROSA et al., 2018).

As matrizes das 16 séries temporais possuem 3600 pontos cada -  $60 \times 60$ , mas também foram processadas em 10 outras escalas (cada matriz): 900 pontos cada -  $30 \times 30$ , 400 pontos cada -  $20 \times 20$ , 225 pontos cada -  $15 \times 15$ , 144 pontos cada -  $12 \times 12$ , 100 pontos cada -  $10 \times 10$ , 36 pontos cada -  $6 \times 6$ , 25 pontos cada -  $5 \times 5$ , 16 pontos cada -  $4 \times 4$ , 9 pontos cada -  $3 \times 3$ , 4 pontos cada -  $2 \times 2$ . Esta metodologia utilizada é do próprio autor.

Quanto às análises via PSD e DFA, foram processadas as 16 séries temporais, redimensionadas de 3600 pontos para 2048 pontos, para satisfazer o critério de análise do PSD tendo número de pontos igual à uma potência de 2, utilizando o *software* de Zeferino (2017a), cuja documentação está contida em Zeferino (2017b).

Com base nas análises realizadas via GPA pode-se concluir:

1. As implicações destas características evidenciadas nos casos de similaridades entre os valores de G<sub>2</sub> das séries, no provável contexto físico da geração das tempestades de ruído são que as séries "A5\_Chua-Chaos\_Y1", "A8\_PModel" merecem um estudo comparativo mais aprofundado entre séries temporais canônicas e séries temporais de emissões solares Tipo I, pois apresentaram características próximas às séries

temporais solares. Sugere-se que sejam analisadas outras séries temporais canônicas com características similares às das séries "A5\_Chua-Chaos\_Y1", "A8\_PModel", ou até mesmo seja estudada a possível hibridização entre essas duas séries, podendo se assemelharem mais, a partir da hibridização, das séries de emissões solares Tipo I. Também sugere-se que seja aumentado o número de amostras de séries temporais de emissões solares Tipo I com o objetivo de verificar se o comportamento de similaridade entre estas 2 séries canônicas, uma turbulenta("A8\_PModel") e outra caótica ("A5\_Chua-Chaos\_Y1"), se repetirá;

2. Desta forma, sugere-se, como continuação desta análise via GPA, que seja aumentado o número de amostras de séries de radioemissões solares Tipo I, bem como de séries relacionadas à turbulência, bem como estudar séries híbridas (preferencialmente entre caóticas e turbulentas), para verificar a existência desse tipo de complexidade física, pois talvez a série que mais tenha compatibilidade com esse tipo de radioemissões solares seja uma hibridização entre séries caóticas e turbulentas.

Com base nas análises realizadas via PSD e DFA pode-se concluir:

 Deve-se destacar os valores do PSD e DFA da série "A8\_PModel", como sendo os que mais se assemelham aos valores das séries temporais de emissões solares Tipo I, pois apresenta, dentre todas as séries temporais canônicas, valores do DFA, PSD e também dos valores de G<sub>2</sub> mais próximos comparados aos mesmos valores das séries temporais de tempestades de ruído Tipo I.

Pode-se enumerar os produtos e resultados obtidos com o trabalho:

- Aprovação pela primeira vez desta técnica para análise de dados solares em ondas métricas;
- Desenvolvimento ou adaptação de ferramentas pra essa análise, destacando softwares de manipulação das séries obtidas do e-CALLISTO, de mapeamento de séries temporais em matrizes, e da transformação de uma matriz em diversas escalas compatíveis, todos esses de autoria do próprio autor;
- A caracterização, mesmo que para uma amostra pequena, do comportamento destas emissões como semelhante, em algumas escalas, à série turbulenta "A8\_PModel";

4. A confirmação da vantagem do GPA, prevista por Assireu et al. (2002) sobre as demais técnicas para séries curtas, uma vez que o GPA consegue detectar semelhanças ou diferenças entre séries, com mais acurácia, uma vez que, por exemplo, o PSD e DFA do *Pink Noise* se aproximou de algumas séries (detalhadas anteriormente) de emissões solares Tipo I, porém o G<sub>2</sub> foi distante, e, em contrapartida, o PSD e DFA da série "A8\_PModel" foi próximo a algumas séries de emissões Tipo I, e também o G<sub>2</sub> foi próximo.

### 5.1 Trabalhos Futuros

Com o objetivo de dar continuidade para a busca do padrão de flutuação que mais se adéqua às séries de tempestades de ruído solares Tipo I, considerando que a evolução de sistemas complexos são expressões dos comportamentos dinâmicos, incertos e de causalidades em constantes mudanças de potenciais processos multivariados em um sistema, que exibem características de incertezas, dinâmicas não-lineares e flutuação aperiódicas, estas características apresentam um grande desafio para prever os estados das evoluções de sistemas complexos de forma acurada (JIANG; CHEN; LIU, 2016).

Métodos de aprendizagem supervisionada em Inteligência Artificial, como as Redes Neurais Artificias (ANNs) e Máquinas de Vetores de Suporte (SVM), são adequadas para predição de séries temporais não-lineares; no entanto, devido à dificuldade da problemática de extração de características dependente de conhecimento anterior, e a fraqueza da aprendizagem superficial, o uso de Redes Neurais Artificiais (ANNs) tradicionais, e Máquinas de Vetores de Suporte (SVM) dificultam a garantia da acurácia da predição e estabilidade (JIANG; CHEN; LIU, 2016).

Como o estudo deste trabalho envolve análise de séries temporais complexas, e para facilitar essas análises o uso de Inteligência Artificial é altamente recomendado, mas considerando que o uso de técnicas tradicionais de Inteligência Artificial não tem a eficiência desejada em análises mais complexas, propõe-se aplicar, para futuras análises envolvendo o escopo do trabalho desta dissertação, uma abordagem de *Deep Learning*, ou Aprendizagem Profunda, de Jiang, Chen e Liu (2016), que hibridiza Redes Neurais Profundas (DBNs) e Máquina de Vetor de Suporte (SVM) Evolucionária e Paralela baseada em Núcleo Não-Linear (ESVM), para predizer a evolução de estados de sistemas complexos de uma maneira classificativa, abordagem esta que demonstra que as técnicas sugeridas supera as técnicas tradicionais, e podem oferecer uma ferramenta de suporte à decisão inteligente para predizer evoluções de sistemas complexos.

Sugere-se também, conforme foi comentado de maneira detalhada anteriormente, aumentar o número de amostras de séries temporais de radioemissões solares Tipo I, a fim de comparar com um número também maior de amostras de séries temporais relacionadas à turbulência, bem como séries temporais híbridas, com características turbulentas e caóticas, uma vez que séries temporais caóticas também se aproximaram de algumas séries temporais de radioemissões solares Tipo I.

## REFERÊNCIAS

AGUIRRE, A. Uma introdução à análise espectral de séries temporais econômicas. *Nova Economia*, v. 5, n. 1, 2013. Citado na página 111.

ANACONDA. Anaconda Distribution. 2018. Sítio eletrônico. Disponível em: <a href="https://www.anaconda.com/">https://www.anaconda.com/</a>. Acesso em: 21 jan 2018. Citado na página 57.

ASCHWANDEN, M. J. Particle acceleration and kinematics in solar flares – a synthesis of recent observations and theoretical concepts (invited review). Space Science Reviews, v. 101, n. 1, p. 1–227, 2002. ISSN 1572-9672. Disponível em: <a href="https://doi.org/10.1023/A:1019712124366">https://doi.org/10.1023/A:1019712124366</a>>. Citado na página 34.

ASCHWANDEN, M. J. *Physics of the Solar Corona. An Introduction*. [S.I.]: Springer Berlin Heidelberg, 2004. 842 p. (Geophysical Sciences). Citado na página 34.

ASCHWANDEN, M. J. *Physics of the Solar Corona*: An introduction with problems and solutions. [S.l.]: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005. 908 p. ISBN 9783540223214. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 34.

ASCHWANDEN, M. J. Self-Organized Criticality in Astrophysics: The Statistics of Nonlinear Processes in the Universe. [S.l.]: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011. 416 p. ISBN 978-3-642-15001-2. Citado 5 vezes nas páginas 39, 40, 41, 42 e 43.

ASSIREU, A. T. et al. Aplicação do operador de fragmentação assimétrica (fa) na caracterização de controles geomorfológicos em reservatórios hidroelétricos. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 32, n. 4, p. 501–508, 2004. Disponível em: <<u>http://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/rbg/article/view/9778></u>. Acesso em: 23 jan. 2018. Citado na página 44.

ASSIREU, A. T. et al. Gradient pattern analysis of short nonstationary time series: an application to lagrangian data from satellite tracked drifters. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, Elsevier, v. 168-169, p. 397–403, 2002. ISSN 0167-2789. VII Latin American Workshop on Nonlinear Phenomena. Disponível em: <<u>http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167278902005274></u>. Acesso em: 23 jan. 2018. Citado 9 vezes nas páginas 28, 44, 47, 48, 59, 63, 78, 79 e 81.

BAKER, G. L.; GOLLUB, J. P. *Chaotic dynamics: an introduction*. [S.l.]: Cambridge University Press, 1990. 136 p. Citado na página 109.

BARCHI, P. H. 2017. Comunicação privada. Citado 6 vezes nas páginas 55, 73, 75, 79, 106 e 107.

BENZ, A. O. *Plasma Astrophysics: Kinetic Processes in Solar and Stellar Coronae.* 2. ed. [S.l.]: Kluwer Academic Publishers, 2002. 309 p. ISBN 9780792324294. Citado 3 vezes nas páginas 36, 37 e 38.

BENZ, A. O.; BASTIAN, T. S.; GARY, D. E. Radio emission from solar flares. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, v. 36, n. 1, p. 131–188, 1998. Disponível em: <a href="https://doi.org/10.1146/annurev.astro.36.1.131">https://doi.org/10.1146/annurev.astro.36.1.131</a>. Citado na página 33.

BENZ, A. O.; HUBA, J. D.; SPICER, D. S. Solar type i noise storms and newly emerging magnetic flux. *Astronomy and Astrophysics*, v. 105, p. 221–228, 1982. Citado na página 39.

BENZ, A. O.; MEYER, H.; MONSTEIN, C. Callisto – a new concept for solar radio spectrometers. *Solar Physics*, v. 226, n. 1, p. 143–151, 2005. ISSN 1573-093X. Disponível em: <a href="https://doi.org/10.1007/s11207-005-5688-9">https://doi.org/10.1007/s11207-005-5688-9</a>. Citado na página 34.

BENZ, A. O. et al. A world-wide net of solar radio spectrometers: e-callisto. *Earth, moon, and planets*, Springer, v. 104, n. 1-4, p. 277–285, 2009. Disponível em: <<u>https://doi.org/10.1007/s11038-008-9267-6</u>. Acesso em: 10 jan 2018. Citado na página 51.

BULDYREV, S. V. et al. Long-range correlation properties of coding and noncoding dna sequences: Genbank analysis. *Physical Review E*, APS, v. 51, n. 5, p. 5084, 1995. Citado na página 115.

CHAPRA, S. C. Métodos numéricos aplicados com Matlab para engenheiros e cientistas. [S.l.]: AMGH Editora, 2013. 655 p. Citado na página 110.

CINTRA, M. A. U.; FERNANDES, F. C. R.; ROSA, R. R. Estudo de séries temporais estocásticas via análise de padrões-gradiente. In: Anais do XXI Encontro Latino Americano de Iniciação Científica, XVII Encontro Latino Americano de Pós-Graduação, XI INIC Jr da UNIVAP, VII INID. São José dos Campos: UNIVAP, 2017. Disponível em: <a href="http://www.inicepg.univap.br/cd/INIC\_2017/anais/arquivos/RE\_0108\_1073\_03.pdf">http://www.inicepg.univap.br/cd/INIC\_2017/anais/arquivos/RE\_0108\_1073\_03.pdf</a>). Acesso em: 23 jan. 2018. Citado 3 vezes nas páginas 28, 59 e 63.

COOLEY, J. W.; TUKEY, J. W. An algorithm for the machine calculation of complex fourier series. *Mathematics of Computation*, American Mathematical Society, v. 19, n. 90, p. 297–301, 1965. ISSN 00255718, 10886842. Disponível em: <<u>http://www.jstor.org/stable/2003354></u>. Citado na página 110.

CORDEIRO, T. L. Quantificação da complexidade do relevo e suas implicações para Propriedades Aerodinâmicas. 66 f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) — Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2015. Disponível em: <a href="https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/handle/123456789/149">https://repositorio.unifei.edu.br/xmlui/handle/123456789/149</a>>. Acesso em: 10 jan 2018. Citado na página 44.

DANTAS, M. D. S. Análise espectral de padrões-gradiente de séries temporais curtas. 157 f. Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009. Disponível em: <<u>http://urlib.net/rep/8JMKD3MGP8W/34MM5S8?ibiurl.language=pt-BR></u>. Acesso em: 23 jan. 2018. Citado 8 vezes nas páginas 27, 47, 48, 59, 63, 109, 110 e 111.

DANTAS, M. D. S. Um ambiente virtual colaborativo de computação científica para análise avançada de séries temporais. Tese (Doutorado em Computação Aplicada) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2014. Disponível em: <a href="http://mtc-m21b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21b/2014/08.25.14.21/doc/publicacao.pdf">http://mtc-m21b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21b/2014/08.25.14.21/doc/publicacao.pdf</a>>. Citado 3 vezes nas páginas 113, 114 e 115.

ELGARØY, Ø. Studies in high-resolution spectrometry of solar radio emission. *Astrophysica Norvegica*, v. 7, p. 123, 1961. Citado na página 36.

EMSLIE, A. G. et al. Energy partition in two solar flare/cme events. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, v. 109, n. A10, p. A10104, 2004. Disponível em: <a href="https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2004JA010571">https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2004JA010571</a>. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 33.

FAN, Y. Magnetic fields in the solar convection zone. *Living Reviews in Solar Physics*, v. 6, 2009. Disponível em: <a href="https://doi.org/10.12942/lrsp-2009-4">https://doi.org/10.12942/lrsp-2009-4</a>. Acesso em: 20 jul 2018. Citado na página 30.

FERNANDES, F. et al. Investigations of the acceleration region of energetic electrons associated with decimetric type iii and x-ray bursts. *Advances in Space Research*, Elsevier Science, v. 25, n. 9, p. 1813–1816, 2000. Citado na página 35.

FERNANDES, F. C. R. et al. Flaring loop parameters estimated from solar decimeter type u-like and type j-like fine structures. *Advances in Space Research*, v. 49, n. 11, p. 1607–1614, 2012. Citado na página 35.

FERNANDES, F. C. R.; SAWANT, H. S. Physical parameters of the exciter of the decimetric type iii bursts. In: 6th Brazilian plasma astrophysics workshop, edited by RMO Galvlo, Brazilian Physics Society Series. [S.l.: s.n.], 1996. v. 4, p. 125–128. Citado na página 35.

FERNANDES, F. C. R.; SODRÉ, Z. A. L. Parameters of type i chains and their association with flares in x-ray. In: DOROTOVIC, I.; FISCHER, C. E.; TEMMER, M. (Ed.). *Coimbra Solar Physics Meeting: Ground-based Solar Observations in the Space Instrumentation Era.* [S.l.: s.n.], 2016. (Astronomical Society of the Pacific Conference Series, v. 504), p. 143. Citado na página 36.

FERNANDES, F. C. R.; SODRÉ, Z. A. L.; WRASSE, C. M. Radio noise storms and the connection with the reorganization of photospheric magnetic fields. Submetido. 2018. Citado na página 37.

FILHO, K. D. S. O.; SARAIVA, M. D. F. O. Astronomia & Astrofísica. 2. ed. [S.1.]: Livraria da Física, 2004. 557 p. Citado na página 29.

FREITAS, R. M. Laboratório virtual para visualização e caracterização do uso e cobertura da terra utilizando imagens de sensoriamento remoto. 255 f. Tese (Doutorado em Computação Aplicada) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2012. Disponível em: <a href="http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3BDRG5P">http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3BDRG5P</a>. Acesso em: 10 jan 2018. Citado na página 44.

FRISCH, U. *Turbulence: the legacy of an kolmogorov.* [S.l.]: Cambridge University Press, 1995. 312 p. Citado na página 111.

GARY, G. A. Plasma beta above a solar active region: Rethinking the paradigm. Solar Physics, v. 203, n. 1, p. 71–86, 2001. ISSN 1573-093X. Disponível em: <a href="https://doi.org/10.1023/A:1012722021820">https://doi.org/10.1023/A:1012722021820</a>>. Citado na página 31.

GEÇKINLI, N.; YAVUZ, D. Discrete Fourier transformation and its applications to power spectra estimation. [S.l.]: Elsevier Scientific Publishing Company, 2013. 340 p. Citado na página 110.

GINZBURG, V. L.; ZHELEZNIAKOV, V. V. On the mechanisms of sporadic solar radio emission. *Symposium - International Astronomical Union*, Cambridge University Press, v. 9, p. 574–582, 1959. Citado na página 33.

GOLINSKA, A. K. Detrended fluctuation analysis (dfa) in biomedical signal processing: selected examples. *Stud. Logic Grammar Rhetoric*, v. 29, p. 107–115, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 113 e 115.

GUERRIERO, V. Power law distribution: Method of multi-scale inferential statistics. Journal of Modern Mathematics Frontier, Science and Engineering Publishing Company, v. 1, n. 1, p. 21–28, 2012. Citado na página 113.

HATHAWAY, D. H. The solar cycle. on the probable existence of a magnetic field in sun-spots. *Living Rev. Solar Physics*, v. 1, n. 7, 2010. Disponível em: <<u>https://doi.org/10.1007/s11207-017-1108-1></u>. Acesso em: 10 jul 2018. Citado na página 30.

HATHAWAY, D. H. *The Solar Interior*. 2011. Sítio eletrônico. Disponível em: <<u>http://solarscience.msfc.nasa.gov/interior.shtml</u>>. Acesso em: 12 jul 2018. Citado na página 29.

HATHAWAY, D. H. *The Sunspot Cycle*. 2013. Sítio eletrônico. Disponível em: <<u>http://solarscience.msfc.nasa.gov/SunspotCycle.shtml.ButterflyDiagram></u>. Acesso em: 12 jul 2018. Citado na página 29.

HEINZEL, G.; RÜDIGER, A.; SCHILLING, R. Spectrum and spectral density estimation by the Discrete Fourier transform (DFT), including a comprehensive list of window functions and some new at-top windows. 2002. Disponível em: <http://pubman.mpdl.mpg.de/pubman/item/escidoc:152164:1/component/escidoc: 152163/395068.pdf>. Citado na página 27.

HOLMAN, G. D. Acceleration of runaway electrons and joule heating in solar flares. *Astrophysical Journal*, v. 293, p. 584–594, 1985. Citado na página 32.

HUDSON, H. S. Solar flare discovery. Solar Physics, v. 113, n. 1, p. 1–12, 1982. ISSN 1573-093X. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF00147677>. Citado na página 31.

IWAI, K. et al. Peak flux distributions of solar radio type-i bursts from highly resolved spectral observations. *The Astrophysical Journal Letters*, v. 768, n. 1, p. L2, 2013. Disponível em: <a href="http://stacks.iop.org/2041-8205/768/i=1/a=L2">http://stacks.iop.org/2041-8205/768/i=1/a=L2</a>. Citado na página 39.

IWAI, K. et al. Solar radio type-i noise storm modulated by coronal mass ejections. *The Astrophysical Journal*, v. 744, n. 2, p. 167, 2012. Disponível em: <<u>http://stacks.iop.org/0004-637X/744/i=2/a=167></u>. Citado na página 39.

JETBRAINS. *PyCharm.* 2018. Sítio eletrônico. Disponível em: <a href="https://www.jetbrains.com/pycharm/">https://www.jetbrains.com/pycharm/</a>. Acesso em: 21 jan 2018. Citado na página 57.

JIANG, P.; CHEN, C.; LIU, X. Time series prediction for evolutions of complex systems: A deep learning approach. In: 2016 IEEE International Conference on Control and Robotics Engineering (ICCRE). [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–6. Citado na página 81.

KAI, K.; MELROSE, D. B.; SUZUKI, S. Storms. In: \_\_\_\_\_. Solar Radiophysics: Studies of Emission from the Sun at Metre Wavelengths. [S.l.]: Cambridge University Press, 1985. p. 415–441. Citado na página 36.

KANE, S. R. et al. Energy release and dissipation during giant solar flares. *The Astrophysical Journal*, v. 446, p. L47, 1995. Citado na página 31.

KARLICKÝ, M. Chains of type-i radio bursts and drifting pulsation structures. Astronomy & Astrophysics, EDP Sciences, v. 602, p. A122, 2017. Citado na página 39.

KLEIN, K. L. et al. On the propagation of a large-scale shock wave in the corona. In: WILSON, A. (Ed.). *Fifth SOHO Workshop: The Corona and Solar Wind Near Minimum Activity*. [S.l.: s.n.], 1997. (ESA Special Publication, v. 404), p. 461–464. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 35.

KOSKINEN, H. *Physics of Space Storms: From the Solar Surface to the Earth.* [S.l.]: Springer Berlin Heidelberg, 2011. (Springer Praxis Books). ISBN 9783642003196. Citado na página 32.

KRÜGER, A. Introduction to Solar Radio Astronomy and Radio Physics. [S.I.]: Springer Netherlands, 1979. 332 p. ISBN 9789400994027. Citado na página 51.

KUNDU, M. R. *Solar radio astronomy*. [S.l.]: Interscience Publishers, 1965. Citado na página 33.

KUTNER, M. Astronomy: A Physical Perspective. [S.l.]: Cambridge University Press, 2003. 598 p. Citado na página 29.

LANG, K. R. *The Sun from Space*. [S.l.]: Springer Berlin Heidelberg, 2009. (Astronomy and Astrophysics Library). ISBN 9783540869719. Citado na página 34.

LANG, K. R. *Essential Astrophysics*. [S.l.]: Springer Berlin Heidelberg, 2013. ISBN 9783642359637. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 32.

LI, C. Y. et al. Euv and magnetic activities associated with type-i solar radio bursts. *Solar Physics*, v. 292, n. 6, p. 82, 2017. ISSN 1573-093X. Disponível em: <<u>https://doi.org/10.1007/s11207-017-1108-1></u>. Citado na página 37.

LOBZIN, V. V. et al. Automatic recognition of type iii solar radio bursts: automated radio burst identification system method and first observations. *Space Weather*, American Geophysical Union (AGU), v. 7, n. 4, p. 1–12, 2009. Citado na página 28.

MALVILLE, J. M. Characteristics of type iii radio bursts. *The Astrophysical Journal*, v. 136, p. 266, 1962. Citado na página 36.

MANGENEY, A.; RAOULT, A.; VLAHOS, L. An injection model for type iii/v bursts in solar flares. *Astronomy and Astrophysics*, v. 233, p. 229–234, 1990. Citado na página 36.

MASUDA, S. et al. Hard x-ray sources and the primary energy-release site in solar flares. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, v. 47, p. 677–689, 1995. Citado na página 32.

MCLEAN, D. J. Solar activity in the corona. *Publications of the Astronomical Society of Australia*, Cambridge University Press, v. 4, n. 2, p. 132–138, 1981. Citado na página 29.

MCLEAN, D. J. Metrewave solar radio bursts. In: \_\_\_\_\_. Solar Radiophysics: Studies of Emission from the Sun at Metre Wavelengths. [S.l.]: Cambridge University Press, 1985. p. 37–52. Citado 3 vezes nas páginas 34, 35 e 36.

MELÉNDEZ, J. L. et al. Statistical analysis of high-frequency decimetric type iii bursts. *Solar Physics*, Springer, v. 187, n. 1, p. 77–88, 1999. Citado na página 35.

MELROSE, D. B. Plasma emission mechanisms. In: \_\_\_\_\_. Solar Radiophysics: Studies of Emission from the Sun at Metre Wavelengths. [S.l.]: Cambridge University Press, 1985. p. 177–210. Citado na página 33.

MELROSE, D. B. Solar flares - current dissipation or magnetic annihilation? Australian Journal of Physics, v. 46, p. 167–193, 1993. Citado na página 32.

MÉSZÁROSOVÁ, H. et al. Solar decimetric type iii bursts in semi-closed magnetic field structures. Astronomy & Astrophysics, EDP Sciences, v. 484, n. 2, p. 529–536, 2008. Disponível em: <a href="https://doi.org/10.1051/0004-6361:20077634">https://doi.org/10.1051/0004-6361:20077634</a>. Citado na página 35.

MILLER, J. A. et al. Critical issues for understanding particle acceleration in impulsive solar flares. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, v. 102, n. A7, p. 14631–14659, 1997. Disponível em: <a href="https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/97JA00976">https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/97JA00976</a>. Citado na página 33.

MOECKE, M. Princípios de sistemas de telecomunicações: noções de espectros de frequência. 2006. 161 p. Sítio eletrônico. Disponível em: <a href="https://wiki.sj.ifsc.edu.br/wiki/images/1/1d/Apostila\_de\_PRT\_2014-1\_(Material\_Professores\_Saul-Moecke">https://wiki.sj.ifsc.edu.br/wiki/images/1/1d/Apostila\_de\_PRT\_2014-1\_(Material\_Professores\_Saul-Moecke).pdf</a>. Acesso em: 10 dez 2017. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 109.

MONSTEIN, C. A. *Bleien Solar Radio Data*. 2011a. Sítio eletrônico. Créditos ao Instituto de Astronomia, ETH Zurich, e FHNW Windisch, Suíça. Disponível em: <<u>http://soleil.i4ds.ch/solarradio/data/2002-20yy\_Callisto/2011/07/30/BLEN7M\_</u>20110730\_054503\_25.fit.gz>. Acesso em: 10 dez 2017. Citado 5 vezes nas páginas 52, 72, 74, 79 e 97.

MONSTEIN, C. A. *Bleien Solar Radio Data*. 2011b. Sítio eletrônico. Créditos ao Instituto de Astronomia, ETH Zurich, e FHNW Windisch, Suíça. Disponível em: <a href="http://soleil.i4ds.ch/solarradio/qkl/2011/07/30/BLEN7M\_20110730\_054503\_25.fit.gz.png">http://soleil.i4ds.ch/solarradio/qkl/2011/07/30/BLEN7M\_20110730\_054503\_25.fit.gz.png</a>>. Acesso em: 10 dez 2017. Citado na página 97.

MONSTEIN, C. A. *Bleien Solar Radio Data*. 2011c. Sítio eletrônico. Créditos ao Instituto de Astronomia, ETH Zurich, e FHNW Windisch, Suíça. Disponível em: <<u>http://soleil.i4ds.ch/solarradio/data/2002-20yy\_Callisto/2011/07/30/BLEN7M\_</u>20110730\_060002\_25.fit.gz>. Acesso em: 10 dez 2017. Citado 5 vezes nas páginas 52, 72, 74, 79 e 98.

MONSTEIN, C. A. *Bleien Solar Radio Data*. 2011d. Sítio eletrônico. Créditos ao Instituto de Astronomia, ETH Zurich, e FHNW Windisch, Suíça. Disponível em: <a href="http://soleil.i4ds.ch/solarradio/qkl/2011/07/30/BLEN7M\_20110730\_060002\_25.fit.gz.png">http://soleil.i4ds.ch/solarradio/qkl/2011/07/30/BLEN7M\_20110730\_060002\_25.fit.gz.png</a>>. Acesso em: 10 dez 2017. Citado na página 98.

MONSTEIN, C. A. *Bleien Solar Radio Data.* 2011e. Sítio eletrônico. Créditos ao Instituto de Astronomia, ETH Zurich, e FHNW Windisch, Suíça. Disponível em: <<u>http://soleil.i4ds.ch/solarradio/data/2002-20yy\_Callisto/2011/07/30/BLEN7M\_</u>20110730\_061502\_25.fit.gz>. Acesso em: 10 dez 2017. Citado 5 vezes nas páginas 52, 72, 74, 79 e 99.

MONSTEIN, C. A. *Bleien Solar Radio Data*. 2011f. Sítio eletrônico. Créditos ao Instituto de Astronomia, ETH Zurich, e FHNW Windisch, Suíça. Disponível em: <a href="http://soleil.i4ds.ch/solarradio/qkl/2011/07/30/BLEN7M\_20110730\_061502\_25.fit.gz.png">http://soleil.i4ds.ch/solarradio/qkl/2011/07/30/BLEN7M\_20110730\_061502\_25.fit.gz.png</a>>. Acesso em: 10 dez 2017. Citado na página 99.

MONSTEIN, C. A. *Bleien Solar Radio Data.* 2011g. Sítio eletrônico. Créditos ao Instituto de Astronomia, ETH Zurich, e FHNW Windisch, Suíça. Disponível em: <<u>http://soleil.i4ds.ch/solarradio/data/2002-20yy\_Callisto/2011/07/30/BLEN7M\_</u>20110730\_063002\_25.fit.gz>. Acesso em: 10 dez 2017. Citado 7 vezes nas páginas 52, 72, 74, 79, 100, 112 e 116.

MONSTEIN, C. A. *Bleien Solar Radio Data*. 2011h. Sítio eletrônico. Créditos ao Instituto de Astronomia, ETH Zurich, e FHNW Windisch, Suíça. Disponível em: <a href="http://soleil.i4ds.ch/solarradio/qkl/2011/07/30/BLEN7M\_20110730\_063002\_25.fit.gz.png">http://soleil.i4ds.ch/solarradio/qkl/2011/07/30/BLEN7M\_20110730\_063002\_25.fit.gz.png</a>>. Acesso em: 10 dez 2017. Citado na página 100.

MONSTEIN, C. A. *Bleien Solar Radio Data*. 2011i. Sítio eletrônico. Créditos ao Instituto de Astronomia, ETH Zurich, e FHNW Windisch, Suíça. Disponível em: <<u>http://soleil.i4ds.ch/solarradio/data/2002-20yy\_Callisto/2011/07/30/BLEN7M\_</u>20110730\_064502\_25.fit.gz>. Acesso em: 10 dez 2017. Citado 5 vezes nas páginas 52, 72, 74, 79 e 101.

MONSTEIN, C. A. *Bleien Solar Radio Data*. 2011j. Sítio eletrônico. Créditos ao Instituto de Astronomia, ETH Zurich, e FHNW Windisch, Suíça. Disponível em: <a href="http://soleil.i4ds.ch/solarradio/qkl/2011/07/30/BLEN7M\_20110730\_064502\_25.fit.gz.png">http://soleil.i4ds.ch/solarradio/qkl/2011/07/30/BLEN7M\_20110730\_064502\_25.fit.gz.png</a>>. Acesso em: 10 dez 2017. Citado na página 101.

MONSTEIN, C. A. *Bleien Solar Radio Data*. 2011k. Sítio eletrônico. Créditos ao Instituto de Astronomia, ETH Zurich, e FHNW Windisch, Suíça. Disponível em: <<u>http://soleil.i4ds.ch/solarradio/data/2002-20yy\_Callisto/2011/07/30/BLEN7M\_</u>20110730\_100002\_25.fit.gz>. Acesso em: 10 dez 2017. Citado 5 vezes nas páginas 52, 72, 74, 79 e 102.

MONSTEIN, C. A. *Bleien Solar Radio Data*. 2011l. Sítio eletrônico. Créditos ao Instituto de Astronomia, ETH Zurich, e FHNW Windisch, Suíça. Disponível em: <a href="http://soleil.i4ds.ch/solarradio/qkl/2011/07/30/BLEN7M\_20110730\_100002\_25.fit.gz.png">http://soleil.i4ds.ch/solarradio/qkl/2011/07/30/BLEN7M\_20110730\_100002\_25.fit.gz.png</a>>. Acesso em: 10 dez 2017. Citado na página 102.

MONSTEIN, C. A. *Bleien Solar Radio Data*. 2011m. Sítio eletrônico. Créditos ao Instituto de Astronomia, ETH Zurich, e FHNW Windisch, Suíça. Disponível em: <<u>http://soleil.i4ds.ch/solarradio/data/2002-20yy\_Callisto/2011/07/30/BLEN7M\_</u>20110730\_110003\_25.fit.gz>. Acesso em: 10 dez 2017. Citado 5 vezes nas páginas 52, 72, 74, 79 e 103.

MONSTEIN, C. A. *Bleien Solar Radio Data.* 2011n. Sítio eletrônico. Créditos ao Instituto de Astronomia, ETH Zurich, e FHNW Windisch, Suíça. Disponível em: <a href="http://soleil.i4ds.ch/solarradio/qkl/2011/07/30/BLEN7M\_20110730\_110003\_25.fit.gz.png">http://soleil.i4ds.ch/solarradio/qkl/2011/07/30/BLEN7M\_20110730\_110003\_25.fit.gz.png</a>>. Acesso em: 10 dez 2017. Citado na página 103.

MONSTEIN, C. A. *Bleien Solar Radio Data.* 20110. Sítio eletrônico. Créditos ao Instituto de Astronomia, ETH Zurich, e FHNW Windisch, Suíça. Disponível em:

<http://soleil.i4ds.ch/solarradio/data/2002-20yy\_Callisto/2011/07/30/BLEN7M\_20110730\_114500\_25.fit.gz>. Acesso em: 10 dez 2017. Citado 5 vezes nas páginas 52, 72, 74, 79 e 104.

MONSTEIN, C. A. *Bleien Solar Radio Data*. 2011p. Sítio eletrônico. Créditos ao Instituto de Astronomia, ETH Zurich, e FHNW Windisch, Suíça. Disponível em: <a href="http://soleil.i4ds.ch/solarradio/qkl/2011/07/30/BLEN7M\_20110730\_114500\_25.fit.gz.png">http://soleil.i4ds.ch/solarradio/qkl/2011/07/30/BLEN7M\_20110730\_114500\_25.fit.gz.png</a>>. Acesso em: 10 dez 2017. Citado na página 104.

MONSTEIN, C. A. *Bleien Solar Radio Data*. 2011q. Sítio eletrônico. Créditos ao Instituto de Astronomia, ETH Zurich, e FHNW Windisch, Suíça. Disponível em: <a href="http://soleil.i4ds.ch/solarradio/qkl/2011/07/30/BLEN7M\_20110730\_074502\_25.fit.gz.png">http://soleil.i4ds.ch/solarradio/qkl/2011/07/30/BLEN7M\_20110730\_074502\_25.fit.gz.png</a>>. Acesso em: 10 dez 2017. Citado na página 37.

MORETTIN, P. A. Ondas e ondaletas: da análise de Fourier à análise de ondaletas. [S.1.]: EDUSP, 1999. 272 p. Citado na página 27.

NASA. *HYPERVELOCITY WINDS RAGE IN THE SUN'S ATMOSPHERE*. 2002. Disponível em: <a href="https://svs.gsfc.nasa.gov/stories/trace\_20020515/images/traceloop3jpg">https://svs.gsfc.nasa.gov/stories/trace\_20020515/images/traceloop3jpg</a>. jpg>. Citado na página 30.

NINDOS, A. et al. Radio emission of flares and coronal mass ejections. *Solar Physics*, Springer, v. 253, n. 1-2, p. 3, 2008. Citado na página 28.

NOAA. 20110730events.txt. 2011. Sítio eletrônico. Disponível em: <ftp://ftp.swpc.noaa. gov/pub/warehouse/2011/2011\_events.tar.gz>. Acesso em: 10 dez 2017. Citado na página 51.

PATZELT, F. *colorednoise.py.* 2017. Sítio eletrônico. Disponível em: <https://github.com/felixpatzelt/colorednoise>. Acesso em: 23 jan 2018. Citado 3 vezes nas páginas 55, 79 e 105.

PENG, C. K. et al. Mosaic organization of dna nucleotides. *Phys. Rev. E*, American Physical Society, v. 49, p. 1685–1689, Feb 1994. Disponível em: <<u>https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.49.1685></u>. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 113.

RAMESH, R. et al. Radioheliograph observations of metric type ii bursts and the kinematics of coronal mass ejections. *The Astrophysical Journal*, v. 712, n. 1, p. 188–193, 2010. Disponível em: <a href="http://stacks.iop.org/0004-637X/712/i=1/a=188">http://stacks.iop.org/0004-637X/712/i=1/a=188</a>. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 35.

RAMOS, F. M. et al. Generalized complex entropic form for gradient pattern analysis of spatio-temporal dynamics. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, v. 283, n. 1, p. 171 – 174, 2000. ISSN 0378-4371. Disponível em: <<u>http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378437100001473></u>. Citado na página 45.

ROSA, R. R. Characterization of spatio-temporal energy fragmentation and turbulence in the solar corona; a phenomenological approach of the coronal fine structure dynamics. Tese (Doutorado em Astrofísica) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1996. Citado na página 28.

ROSA, R. R. et al. Gradient pattern analysis of structural dynamics: application to molecular system relaxation. *Brazilian Journal of Physics*, Scielo, v. 33, p. 605 – 610, 2003. ISSN 0103-9733. Disponível em: <a href="http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\_arttext&pid=S0103-9733200300023&nrm=iso">http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\_arttext&pid=S0103-9733200300023&nrm=iso</a>. Acesso em: 10 jan 2017. Citado 2 vezes nas páginas 44 e 45.

ROSA, R. R. et al. Gradient pattern analysis applied to galaxy morphology. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters*, v. 477, n. 1, p. L101–L105, 2018. Disponível em: <a href="http://dx.doi.org/10.1093/mnrasl/sly054">http://dx.doi.org/10.1093/mnrasl/sly054</a>>. Citado 4 vezes nas páginas 44, 45, 46 e 79.

ROSA, R. R. et al. Gradient pattern analysis of short solar radio bursts. *Advances in Space Research*, v. 42, n. 5, p. 844 – 851, 2008. ISSN 0273-1177. Disponível em: <a href="http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117707009027">http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117707009027</a>>. Citado na página 28.

ROSA, R. R.; SHARMA, A. S.; VALDIVIA, J. A. Characterization of localized turbulence in plasma extended systems. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, v. 257, n. 1, p. 509 – 514, 1998. ISSN 0378-4371. Disponível em: <<u>http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378437198001848></u>. Citado na página 44.

ROSA, R. R.; SHARMA, A. S.; VALDIVIA, J. A. Characterization of asymmetric fragmentation patterns in spatially extended systems. *International Journal of Modern Physics C*, World Scientific, v. 10, n. 01, p. 147–163, 1999. Disponível em: <a href="https://doi.org/10.1142/S0129183199000103">https://doi.org/10.1142/S0129183199000103</a>>. Acesso em: 10 jan. 2018. Citado 3 vezes nas páginas 44, 45 e 46.

ROSOVÁ, H. M. et al. Coronal fast wave trains of the decimetric type iv radio event observed during the decay phase of the june 6, 2000 flare. *Advances in Space Research*, v. 43, n. 10, p. 1479–1483, 2009. ISSN 0273-1177. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117709000829>. Citado na página 35.

SANTOS, J. C.; WRASSE, C. M. Reorganization of photospheric magnetic fields in active regions during energetic flares. *Solar Physics*, v. 291, n. 4, p. 1107–1114, 2016. Disponível em: <a href="https://doi.org/10.1007/s11207-016-0895-0">https://doi.org/10.1007/s11207-016-0895-0</a>. Citado na página 37.

SAUTTER, R. A. *Concentric Gradient Pattern Analysis.* 2017. Sítio eletrônico. Disponível em: <a href="https://github.com/rsautter/Concentric\_GPA">https://github.com/rsautter/Concentric\_GPA</a>. Acesso em: 7 jun 2017. Citado 4 vezes nas páginas 48, 57, 59 e 79.

SCHRIJVER, C. J.; ZWAAN, C. Solar and Stellar Magnetic Activity. [S.l.]: Cambridge University Press, 2000. 404 p. ISBN 9780511546037. Acesso em: 10 jan 2018. Citado na página 27.

SCHROEDER, M. R. Fractals, Chaos, Power Laws: Minutes from an Infinite Paradise. W.H. Freeman, 1991. ISBN 9780716721369. Disponível em: <a href="https://books.google.com.br/books?id=HfcTnwEACAAJ>">https://books.google.com.br/books?id=HfcTnwEACAAJ></a>. Acesso em: 10 jan 2018. Citado na página 42.

SCHUSTER, H. G. *Deterministic chaos: an introduction*. VCH, 1988. ISBN 9783527290888. Disponível em: <a href="https://books.google.com.br/books?id=mZzvAAAAMAAJ>">https://books.google.com.br/books?id=mZzvAAAAMAAJ></a>. Acesso em: 10 jan 2018. Citado na página 41.

SILVA, A. V. R. Nossa Estrela O Sol. [S.l.]: Livraria da Física, 2006. 166 p. (Temas atuais de física). Citado na página 29.

SILVA, R. D. Cunha da. Estudo de radioemissão solar tipo II e sua associação com flare solar e ejeção de massa coronal. 102 f. Dissertação (Mestrado em Física e Astronomia) — Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, 2012. Disponível em: <<u>http://biblioteca.univap.br/dados/000004/00000429.pdf</u>>. Acesso em: 23 jan. 2018. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 35.

SILVA, R. D. Cunha da; FERNANDES, F. C. R.; SELHORST, C. L. Solar type ii radio bursts recorded by the compound astronomical low- frequency low-cost instrument for spectroscopy in transportable observatories in brazil. *Solar Physics*, v. 289, n. 12, p. 4607–4620, 2014. ISSN 1573-093X. Disponível em: <<u>https://doi.org/10.1007/s11207-014-0586-7></u>. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 35.

SILVA, R. D. Cunha da; FERNANDES, F. C. R.; SODRÉ, Z. A. L. Analysis of chains of metric solar type i bursts. *Solar Physics*, v. 290, n. 1, p. 159–168, 2015. ISSN 1573-093X. Disponível em: <<u>https://doi.org/10.1007/s11207-014-0632-5</u>. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 37.

SODRÉ, Z. A. L. Identificação e Análise de Correntes Tipo I Métricas Registradas pelo CALLISTO-BLEN no Período de 30 de julho a 09 de agosto de 2011. 105 f. Dissertação (Mestrado em Física e Astronomia) — Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, 2013. Disponível em: <a href="https://www1.univap.br/marketing/publico/ipd/mestrado-fisastro/DissZuleika.pdf">https://www1.univap.br/marketing/publico/ipd/</a> mestrado-fisastro/DissZuleika.pdf</a>. Acesso em: 23 jan. 2018. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 36.

SOUZA, V. C. O.; ASSIREU, A. T.; ROSA, R. R. Análise de correlação de longo alcance em séries temporais de vento para fins de energia eólica. In: *Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR.* São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2015. p. 1969 – 1974. Disponível em: <a href="http://marte2.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/marte2/2015/06.15.15.00.30/doc/p0391.pdf">http://marte2.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/marte2/2015/06.15.15.00.30/doc/p0391.pdf</a>>. Acesso em: 23 jan. 2018. Citado 2 vezes nas páginas 113 e 115.

STIX, M. *The Sun*: An introduction. 2. ed. [S.l.]: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2002. 492 p. (Astronomy and astrophysics library). ISBN 9783540428862. Citado na página 33.

VERONESE, T. B. et al. Fluctuation analysis of solar radio bursts associated with geoeffective x-class flares. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v. 73, n. 11, p. 1311 – 1316, 2011. ISSN 1364-6826. Influence of Solar Activity on Interplanetary and Geophysical Phenomena. Disponível em: <<u>http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364682610002907></u>. Citado na página 28.

VLAHOS, L. Particle acceleration in solar flares. *Solar Physics*, v. 121, n. 1, p. 431–447, 1989. ISSN 1573-093X. Disponível em: <a href="https://doi.org/10.1007/BF00161711">https://doi.org/10.1007/BF00161711</a>. Citado na página 31.

WARD, L. M.; GREENWOOD, P. E. 1/f noise. 2007. Sítio eletrônico. Disponível em: <<u>http://www.scholarpedia.org/article/1/f\_noise></u>. Acesso em: 10 dez 2017. Citado na página 43.

WARMUTH, A.; MANN, G. The application of radio diagnostics to the study of the solar drivers of space weather. In: SCHERER, K.; FICHTER, H.; HERBER, B. (Ed.). *Lecture Notes in Physics, Berlin Springer Verlag.* [S.l.: s.n.], 2004. v. 656, p. 49. Citado 3 vezes nas páginas 34, 35 e 36.

WICKERT, M. Signals and systems For Dummies. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2013. 387 p. Citado na página 110.

WILD, J. P. Observations of the spectrum of high-intensity solar radiation at metre wavelengths. iii. isolated bursts. *Australian Journal of Scientific Research A Physical Sciences*, CSIRO, v. 3, n. 4, p. 541–557, 1950. Citado na página 33.

WILD, J. P. The beginnings (of solar radiophysics). In: \_\_\_\_\_. Solar Radiophysics: Studies of Emission from the Sun at Metre Wavelengths. [S.l.: s.n.], 1985. p. 3–17. Citado na página 36.

ZEFERINO, P. G. F. 2017a. Comunicação privada. Citado 12 vezes nas páginas 56, 72, 73, 74, 75, 76, 79, 105, 106, 107, 112 e 116.

ZEFERINO, P. G. F. 3DBMO: um gerador de séries temporais canônicas para estudar a dependência dimensional do espectro de potências em sistemas físicos complexos. 115 f. Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2017b. Disponível em:
<a href="http://urlib.net/rep/8JMKD3MGP3W34P/3NB54DL?ibiurl.language=en>">http://urlib.net/rep/8JMKD3MGP3W34P/3NB54DL?ibiurl.language=en></a>. Acesso em: 23 jan. 2018. Citado 17 vezes nas páginas 27, 56, 72, 73, 74, 75, 79, 105, 106, 107, 109, 110, 111, 112, 113, 115 e 116.

ZIRIN, H. Astrophysics of the sun. [S.l.]: Cambridge University Press, 1988. 440 p. Citado na página 31.

Apêndices

# APÊNDICE A – SÉRIES TEMPORAIS ANALISADAS

Neste Apêndice são exibidos os gráficos das séries temporais que foram analisadas neste trabalho, descritas na Seção 3,

Figura 19 – Espectro dinâmico do fragmento (05:45 - 06:00 UTC) da tempestade de ruído registrada em 30 de julho de 2011, pelo Espectrógrafo BLEN7M (arquivo FITS "BLEN7M\_20110730\_054503\_25").



Fonte: (MONSTEIN, 2011b).

Figura 20 – Série temporal em 263,3 MHz da tempestade de ruído registrada em 30 de julho de 2011 (05:45 - 06:00 UTC), com 3600 pontos.



Fonte: produzida pelo autor a partir dos dados de Monstein (2011a).

Figura 21 – Espectro dinâmico do fragmento (06:00 - 06:15 UTC) da tempestade de ruído registrada em 30 de julho de 2011, pelo Espectrógrafo BLEN7M (arquivo FITS "BLEN7M\_20110730\_060002\_25").



Fonte: (MONSTEIN, 2011d).

Figura 22 – Série temporal em 263,3 MHz da tempestade de ruído registrada em 30 de julho de 2011 (06:00 - 06:15 UTC), com 3600 pontos.



Fonte: produzida pelo autor a partir dos dados de Monstein (2011c).

Figura 23 – Espectro dinâmico do fragmento (06:15 - 06:30 UTC) da tempestade de ruído registrada em 30 de julho de 2011, pelo Espectrógrafo BLEN7M (arquivo FITS "BLEN7M\_20110730\_061502\_25").



Fonte: (MONSTEIN, 2011f).

Figura 24 – Série temporal em 263,3 MHz da tempestade de ruído registrada em 30 de julho de 2011 (06:15 - 06:30 UTC), com 3600 pontos.



Fonte: produzida pelo autor a partir dos dados de Monstein (2011e).

Figura 25 – Espectro dinâmico do fragmento (06:30 - 06:45 UT) da tempestade de ruído registrada em 30 de julho de 2011, pelo Espectrógrafo BLEN7M (arquivo FITS "BLEN7M\_20110730\_063002\_25").



Fonte: (MONSTEIN, 2011h).

Figura 26 – Série temporal em 263,3 MHz da tempestade de ruído registrada em 30 de julho de 2011 (06:30 - 06:45 UTC), com 3600 pontos.



Fonte: produzida pelo autor a partir dos dados de Monstein (2011g).

Figura 27 – Espectro dinâmico do fragmento (06:45 - 07:00 UTC) da tempestade de ruído registrada em 30 de julho de 2011, pelo Espectrógrafo BLEN7M (arquivo FITS "BLEN7M\_20110730\_064502\_25").



Fonte: (MONSTEIN, 2011j).

Figura 28 – Série temporal em 263,3 MHz da tempestade de ruído registrada em 30 de julho de 2011 (06:45 - 07:00 UTC), com 3600 pontos.



Fonte: produzida pelo autor a partir dos dados de Monstein (2011i).

Figura 29 – Espectro dinâmico do fragmento (10:00 - 10:15 UTC) da tempestade de ruído registrada em 30 de julho de 2011, pelo Espectrógrafo BLEN7M (arquivo FITS "BLEN7M\_20110730\_100002\_25").



Fonte: (MONSTEIN, 20111).

Figura 30 – Série temporal em 263,3 MHz da tempestade de ruído registrada em 30 de julho de 2011 (10:00 - 10:15 UTC), com 3600 pontos.



Fonte: produzida pelo autor a partir dos dados de Monstein (2011k).

Figura 31 – Espectro dinâmico do fragmento (11:00 - 11:15 UTC) da tempestade de ruído registrada em 30 de julho de 2011, pelo Espectrógrafo BLEN7M (arquivo FITS "BLEN7M\_20110730\_110003\_25").



Fonte: (MONSTEIN, 2011n).

Figura 32 – Série temporal em 263,3 MHz da tempestade de ruído registrada em 30 de julho de 2011 (11:00 - 11:15 UTC), com 3600 pontos.



Fonte: produzida pelo autor a partir dos dados de Monstein (2011m).

Figura 33 – Espectro dinâmico do fragmento (11:45 - 12:00 UTC) da tempestade de ruído registrada em 30 de julho de 2011, pelo Espectrógrafo BLEN7M (arquivo FITS "BLEN7M\_20110730\_114500\_25").



Fonte: (MONSTEIN, 2011p).

Figura 34 – Série temporal em 263,3 MHz da tempestade de ruído registrada em 30 de julho de 2011 (11:45 - 12:00 UTC), com 3600 pontos.



Fonte: produzida pelo autor a partir dos dados de Monstein (2011o).



Figura 35 – Série temporal "White Noise", com 3600 pontos. Escala da Posição em  $10^3$ .

Fonte: produzida pelo autor a partir dos dados de Patzelt (2017) e utilizando, para plotagem, o *software* de Zeferino (2017a) (ZEFERINO, 2017b).





Fonte: produzida pelo autor a partir dos dados de Patzelt (2017) e utilizando, para plotagem, o *software* de Zeferino (2017a) (ZEFERINO, 2017b).



Figura 37 – Série temporal "Red Noise", com 3600 pontos. Escala da Posição em  $10^3$ .

Fonte: produzida pelo autor a partir dos dados de Patzelt (2017) e utilizando, para plotagem, o *software* de Zeferino (2017a) (ZEFERINO, 2017b).



Figura 38 – Série temporal "A0\_Turb6mil", com 3600 pontos. Escala da Posição em 10<sup>3</sup>.

Fonte: produzida pelo autor a partir dos dados de Barchi (2017) e utilizando, para plotagem, o *software* de Zeferino (2017a) (ZEFERINO, 2017b).

Figura 39 – Série temporal "A5\_Chua-Chaos\_Y1", com 3600 pontos. Escala da Posição em  $10^3.$ 



Fonte: produzida pelo autor a partir dos dados de Barchi (2017) e utilizando, para plotagem, o *software* de Zeferino (2017a) (ZEFERINO, 2017b).



Figura 40 – Série temporal "A6\_Logist", com 3600 pontos. Escala da Posição em  $10^3$ .

Fonte: produzida pelo autor a partir dos dados de Barchi (2017) e utilizando, para plotagem, o *software* de Zeferino (2017a) (ZEFERINO, 2017b).


Figura 41 – Série temporal "A7\_Henon \_x", com 3600 pontos. Escala da Posição em 10<sup>3</sup>.

Fonte: produzida pelo autor a partir dos dados de Barchi (2017) e utilizando, para plotagem, o *software* de Zeferino (2017a) (ZEFERINO, 2017b).



Figura 42 – Série temporal "A8\_PModel", com 3600 pontos. Escala da Posição em 10<sup>3</sup>.

Fonte: produzida pelo autor a partir dos dados de Barchi (2017) e utilizando, para plotagem, o *software* de Zeferino (2017a) (ZEFERINO, 2017b).

## APÊNDICE B – PSD E DFA

## B.1 Densidade Espectral de Potência (PSD)

Representa-se um sinal através da amplitude como função da frequência como um espectro de amplitudes; quando o sinal é representado através do quadrado da amplitude, ou potência, a representação é denominada de espectro de potências (MOECKE, 2006 apud ZEFERINO, 2017b).

O espectro de potência da série temporal A(t) é descrito como a variância de seus dados distribuída ao longo dos componentes de frequência em que a A(t) pode ser decomposta (ZEFERINO, 2017b). Segundo Dantas (2009 apud ZEFERINO, 2017b), o espectro de potências (conhecido como Densidade Espectral de Potências) pode ser considerado a metodologia convencional mais utilizada na classificação de um processo estocástico de acordo com a lei de potência obtida a partir de seu espectro.

Conforme Baker e Gollub (1990 apud ZEFERINO, 2017b), dependendo do tipo da função f(t), representa-se o espectro de duas maneiras; caso a função seja periódica, o espectro pode ser expresso como uma combinação linear de oscilações cujas frequências são múltiplos inteiros de uma frequência básica, sendo, neste caso, a combinação linear que recebe o nome de Série de Fourier.

Se a função A(t) não é periódica, o espectro deve ser expresso em termos de oscilações com frequências contínuas. Esta representação é denominada de Transformada de Fourier. Como a Transformada de Fourier é geralmente uma função de valores complexos, muitas vezes prefere-se definir uma função de valores reais que representa o módulo ao quadrado da transformada. Este função é denominada de espectro de potências de A(t), ou *Power Spectrum* (BAKER; GOLLUB, 1990 apud ZEFERINO, 2017b).

O espectro de potências  $P(\omega)$  é definido como o quadrado do módulo da série no domínio da frequência e demonstra a influência da frequência  $\omega$  na série temporal (DANTAS, 2009 apud ZEFERINO, 2017b). Este espectro pode ser obtido via Transformada de Fourier, que permite a transformação de uma série do domínio do tempo para a sua equivalente no domínio de frequência (DANTAS, 2009 apud ZEFERINO, 2017b).

Segundo Zeferino (2017b), definindo uma série temporal A(t), onde  $A(n) = A(t_n)$ ,  $t_n = n\delta t$ , define-se a Transformada de Fourier em sua forma contínua de acordo com a Equação 8:

$$A(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\omega t} A(t) dt$$
(8)

No caso discreto, a Transformada Discreta de Fourier é obtida por meio da Equação 9

$$A_{k} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^{N} x(n) \left[ i \frac{2\pi nk}{N} \right], k = 1, 2, ..., N$$
(9)

Relativamente à área computacional, os algoritmos utilizados para calcular a Transformada Discreta de Fourier mais eficientemente são denominados de Transformada Rápida de Fourier, conhecidos por FFT (*Fast Fourier Transform*) (COOLEY; TUKEY, 1965 apud ZEFERINO, 2017b).

Conforme Wickert (2013 apud ZEFERINO, 2017b), a FFT reflete um dos pilares para o processamento atual de sinais dada a sua eficiência. A melhoria de performance decorre do fato de que a FFT utiliza os resultados de cálculos anteriores reduzindo o número de operações, explorando a periodicidade e simetria das funções trigonométricas (CHAPRA, 2013 apud ZEFERINO, 2017b). Considerando a complexidade computacional, Geçkinli e Yavuz (2013 apud ZEFERINO, 2017b) afirmam que o cálculo tradicional para a Transformada Discreta de Fourier é do tipo  $O(N^2)$ , e utilizando a FFT, esta complexidade se reduz para O(NlogN), em que N representa o tamanho da série temporal.

Segundo Dantas (2009 apud ZEFERINO, 2017b), o espectro de potências no caso contínuo é definido a partir da Equação 8, conforme é definida a Equação 10:

$$P(\omega) = |A(\omega)|^2 \tag{10}$$

No caso discreto, define-se o espectro de potências pela Equação 11:

$$P(\omega) = |A_k|^2 \tag{11}$$

110

O espectro de potências em função de determinada frequência  $\omega$  relaciona-se com esta frequência em função de uma lei de potência dada pela Equação 12:

$$P(\omega_k) \sim \omega_k^{-\beta} \tag{12}$$

A potência  $\beta$  se relaciona diretamente às leis universais de escala, o que indica que cada processo possui uma lei de potência definida; assim sendo, cada valor de  $\beta$ é utilizado para determinar um tipo de ruído aleatório correspondente a um tipo de processo estocástico, o que faz com que ele seja utilizado como um classificador natural para padrões de variabilidade temporal de séries temporais estocásticas (DANTAS, 2009 apud ZEFERINO, 2017b). Como exemplo, segundo Frisch (1995 apud ZEFERINO, 2017b), se a lei de potência de um determinado processo físico seja dada por  $\omega^{\frac{-5}{3}}$ , este processo pode ser caracterizado como um fenômeno correspondente a eventos de turbulência.

Segundo Aguirre (2013 apud ZEFERINO, 2017b), o espectro de potências possui informações sobre a série original destacando o domínio da frequência. As informações que ele disponibiliza indicam quais as frequências que explicam as maiores proporções da variância total da série, tornando a técnica útil para identificar ciclos escondidos no meio das variâncias aleatórias ou ruído.

A Figura 43 demonstra a obtenção do espectro de potência de uma série temporal através da aplicação da Transformada Rápida de Fourier. O valor de  $\beta$  (algumas vezes representado pelo símbolo  $\alpha$ ) corresponde ao valor de inclinação da reta de ajuste.





Fonte: adaptado de (DANTAS, 2009 apud ZEFERINO, 2017b).

Na Figura 44 pode-se visualizar uma série temporal de uma radioemissão solar Tipo I e na Figura 45 pode-se observar um gráfico do PSD desta série temporal.

Figura 44 – Gráfico da série temporal - Tempo $\times$  Amplitude - de uma radioemissão solar Tipo I, com 2048 pontos.



Fonte: produzida pelo autor a partir dos dados de Monstein (2011g) e utilizando, para plotagem, o *software* de Zeferino (2017a) (ZEFERINO, 2017b).

Figura 45 – Gráfico do PSD - Frequência (Hz)  $\times$  Potência - de uma série temporal de radioemissão solar Tipo I, com 2048 pontos.



Fonte: produzida pelo autor a partir dos dados de Monstein (2011g) e utilizando, para plotagem, o *software* de Zeferino (2017a) (ZEFERINO, 2017b).

## B.2 Análise de Flutuação Destendenciada (DFA)

O DFA pode ser utilizado como uma metodologia para a análise de séries temporais, sendo empregada para quantificar as correlações existentes em séries temporais nãoestacionárias em diversas aplicações (DANTAS, 2014; SOUZA; ASSIREU; ROSA, 2015).

Esta técnica foi originalmente descrita por Peng et al. (1994 apud ZEFERINO, 2017b), consistindo na determinação da auto-afinidade de um sinal através de um quantificador denominado de expoente de escala. Este expoente pode ser utilizado para caracterizar padrões temporais provenientes de um processo estocástico com efeito de memória ou correlação de longo alcance (DANTAS, 2014 apud ZEFERINO, 2017b).

Normalmente, segundo Golinska (2012 apud ZEFERINO, 2017b), ocorre uma dependência na lei de potência<sup>1</sup> de um sinal, de forma que o expoente calculado através do DFA representa um bom método para se quantificar a complexidade de um sinal utilizando propriedades fractais (GUERRIERO, 2012 apud ZEFERINO, 2017b).

Segundo Zeferino (2017b), a partir de um sinal A(i), i = 1, 2, ..., N, pode-se obter o valor do expoente de escala calculado através do DFA utilizando os seguintes passos:

1. Primeiro, remove-se o valor médio do sinal de forma a obter valores relativos à sua média (maiores ou menores do que ela). Em seguida, integra-se o sinal através de uma soma cumulativa, como demonstra a Equação 13 , onde  $\bar{A}$  representa o valor médio do sinal A(i):

$$y(k) = \sum_{i=1}^{k} (A(i) - \bar{A}), k = 1, 2, 3, ..., N$$
(13)

- 2. No próximo passo, divide-se o perfil obtido para y(k) em janelas iguais não sobrepostas de tamanho n. Como o valor de N não pode ser um múltiplo inteiro do divisor n, repete-se o procedimento do lado oposto do sinal de forma a obter 2Nn subintervalos.
- 3. Em seguida, utiliza-se o método dos mínimos quadrados para obter uma reta de regressão representativa da tendência do sinal naquele intervalo de tempo, conforme

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> A lei de potência expressa uma relação entre dois escalares  $x \in y$ , a qual pode ser escrita na forma  $y = ax^k$ , onde  $a \in k$  são constantes (GUERRIERO, 2012 apud ZEFERINO, 2017b).

a Equação 14:

$$p_{j}^{m} = b_{j0} + b_{j1}k + \dots + b_{j_{m}-1}k^{m-1} + b_{j_{m}}k^{m}, m = 1, 2, \dots$$
(14)

Na Equação 14, o valor de m representa a ordem de destendenciamento (DF $A^m$ ), b representa o subintervalo e k indica o número de pontos (DANTAS, 2014).

4. Após obter a reta de regressão que representa a tendência do sinal em um determinado intervalo de tempo, realiza-se o destendenciamento calculando a série de desvio acumulado em cada subintervalo, conforme indica a Equação 15:

$$y_j(k) = y(k) - p_j^{\rm m}(k), m = 1, 2, ...$$
 (15)

Em seguida, calcula-se a variância dos subintervalos utilizando a Equação 16 e Equação 17:

$$F^{2}(j,n) = \langle y_{j}^{2}(i) \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \left[ y((j-1)n+1) - p_{j}^{m}(i) \right]^{2} \quad para \ j = 1, 2, ..., N_{n} \ (16)$$

$$F^{2}(j,n) = \langle y_{j}^{2}(i) \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \left[ y(N - (j - N_{n})n + 1) - p_{j}^{m}(i) \right]^{2}$$

$$para \ j = N_{n} + 1, N_{n} + 2, ..., 2N_{n}$$
(17)

5. A flutuação média F(n) do sinal em torno da tendência é obtida na seguinte operação, através da Equação 18:

$$F(n) = \sqrt{\frac{1}{2N_n} \sum_{j=1}^{2N_n} F^2(j,n)}$$
(18)

6. Essa flutuação é calculada novamente recursivamente, para diferentes tamanhos de janela, de modo que possa ser verificada a sua característica fractal, bem como uma relação entre amplitude das flutuações destendenciada e o tamanho das janelas (DANTAS, 2014). Segundo Dantas (2014 apud ZEFERINO, 2017b), na presença de flutuações na forma de uma lei de potência do tipo  $F(n) = kn^{\alpha}$ , o valor de F(N) aumenta linearmente de acordo com o tamanho da janela.

De acordo com Golinska (2012 apud ZEFERINO, 2017b), a dependência linear indica a presença de flutuações e através da plotagem do gráfico em escala logarítmica de  $log F(n) \times log n$ , pode-se obter a reta de regressão dada por  $log F(n) = log K + \alpha log n$ , de foma que o valor da inclinação  $\alpha$  dessa reta indica o expoente de escala que representa as propriedades de autocorrelação do sinal, conforme indicado pela Equação 19:

$$F(n) \sim n^{\alpha} \tag{19}$$

Segundo Buldyrev et al. (1995 apud ZEFERINO, 2017b), o valor do expoente de escala  $\alpha$  está diretamente relacionado com o valor do índice espectral  $\beta$ . Esta relação é dada pela Equação 20.

$$\beta = 2\alpha - 1 \tag{20}$$

A obtenção do valor para o expoente de escala  $\alpha$  pode caracterizar alguns tipos de sinais e fenômenos, conforme indicado pela Tabela 6.

Valor de $\alpha$	Caracterização	Consequência
$0 < \alpha < 0.5$	Anticorrelações	Valores altos são normalmente seguidos por valores baixos e vice-versa.
$\alpha \approx 0.5$	Ruído Branco	Sinal sem nenhuma correlação.
$0.5 < \alpha < 1$	Correlações de longo alcance	Valores altos (baixos) são nor- malmente seguidos por valores altos (baixos).
$\alpha \ge 1$	Existe correlação, mas não na forma da lei de potência	Existem modelos definidos so- mente para alguns valores espe- cíficos de $\alpha$ , como por exemplo: $\alpha = 1.5$ para o ruído browniano e $\alpha = 1.33$ para a turbulência.

Tabela 6 – Valores do expoente de escala  $\alpha$  e suas implicações fenomenológicas.

Fonte: (SOUZA; ASSIREU; ROSA, 2015).

Na Figura 46 pode-se visualizar uma série temporal de uma radioemissão solar Tipo I e na Figura 47 pode-se observar um gráfico do DFA desta série temporal.





Fonte: produzida pelo autor a partir dos dados de Monstein (2011g) e utilizando, para plotagem, o *software* de Zeferino (2017a) (ZEFERINO, 2017b).

Figura 47 – Gráfico do DFA -  $log_{10}(s) \times log_{10}F(s)$  - de uma série temporal de radioemissão solar Tipo I, com 2048 pontos.



Fonte: produzida pelo autor a partir dos dados de Monstein (2011g) e utilizando, para plotagem, o *software* de Zeferino (2017a) (ZEFERINO, 2017b).