

**REUNIÃO DO GRUPO DE FÍSICA ESPACIAL
COMPUTACIONAL (GFEC)
P&D com Gradient Pattern Analysis (GPA)
06/05/2021**

**APRESENTAÇÃO A3 - GPA 1D - ANÁLISE DE SÉRIES
TEMPORAIS (EXS. FÍSICA ESPACIAL)**

MARCO ANTÔNIO DE ULHÔA CINTRA - DOUTORANDO PPGCAP-INPE

ORIENTADORES:

PROF. DR. REINALDO R. ROSA - INPE

PROFA. DRA. M. TERESA BARATA - UNIV. COIMBRA/PORTUGAL

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS - INPE

COORDENAÇÃO DE PESQUISA APLICADA E DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO - COPDT

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO APLICADA - PPGCAP

INTRODUÇÃO

- ▶ Ferramentas para análise de séries temporais
 - ▶ Sinais não-estacionários com lei de potência no espectro (processos não-lineares típicos: flutuações estocásticas, turbulência, caos e criticalidade auto-organizada)
 - ▶ PSD (*Power Spectral Density*)
 - ▶ DFA (*Detrended Fluctuation Analysis*)
 - ▶ GPA (*Gradient Pattern Analysis*)

INTRODUÇÃO

- ▶ Investigação das causas dos padrões de flutuação de radioemissões solares com GPA
 - ▶ Rosa et. al. (2008)
 - ▶ Faixa de microondas
 - ▶ Cintra, Fernandes e Rosa (2017)
 - ▶ Radioemissões solares Tipo I
 - ▶ Comparação com ruídos canônicos
 - ▶ Identificação dos padrões de variabilidade

OBJETIVO GERAL

Consolidar a aplicação da técnica GPA, em séries temporais, via construção do **Espectro Gradiente** utilizando o valor do 2° *Momento Gradiente* (G2) (desenvolvido em 2018) para análise INÉDITA de séries temporais de radioemissões solares Tipo I (tempestades de ruído)

Objetivos específicos

- ▶ Aplicar pela primeira vez o GPA na análise das séries temporais solares do Tipo I de forma comparativa com sinais canônicos: estocásticos e caóticos
- ▶ Desenvolver um algoritmo em Python para cálculo do espectro gradiente via G2
- ▶ Análise de desempenho do **Espectro Gradiente** utilizando técnicas usuais como PSD e DFA

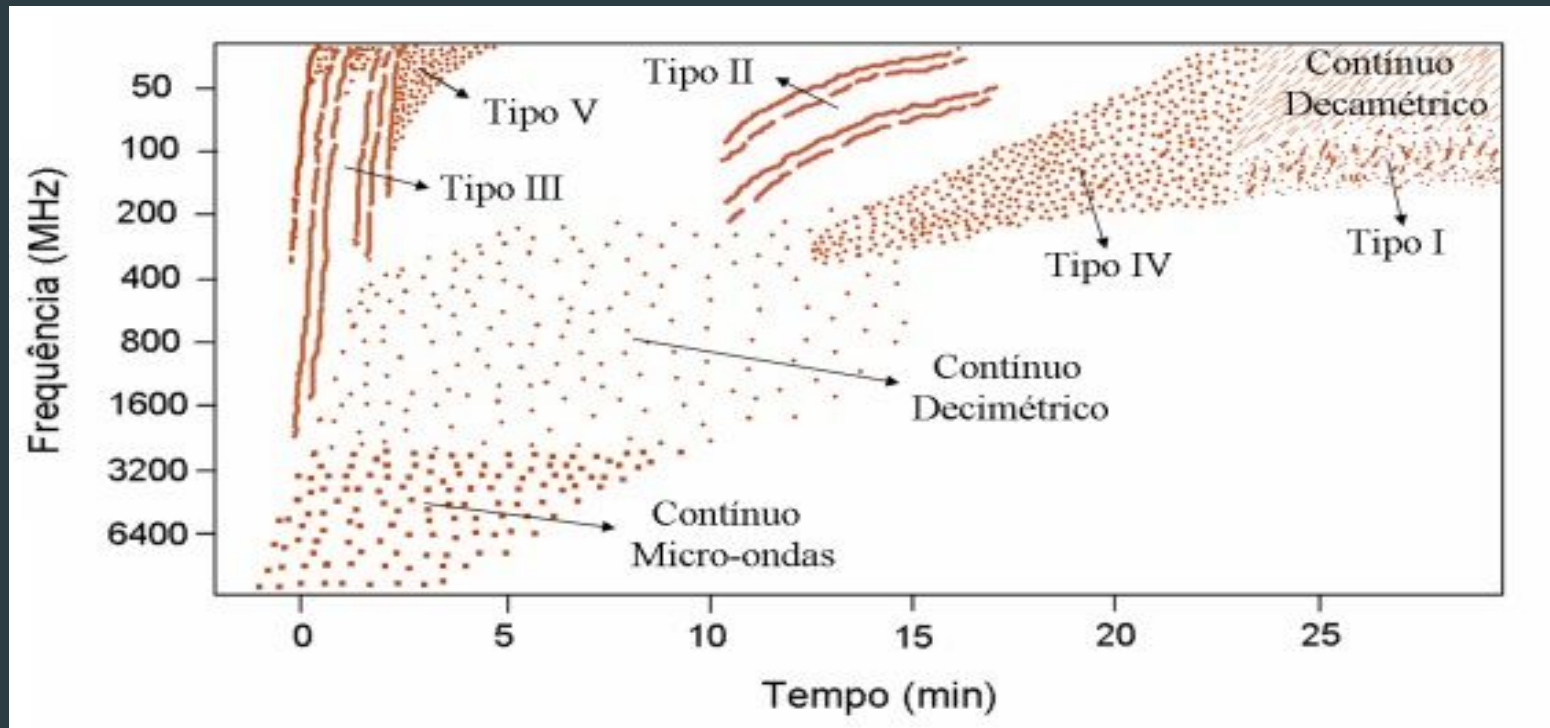
META CIENTÍFICA

- Com base, principalmente, no comportamento do **espectro gradiente**, identificar qual é o padrão de flutuação canônico que se comporta de forma semelhante aos padrões de flutuação das tempestades Tipo I selecionadas.



REVISÃO: EXPLOSÕES SOLARES EM RÁDIO

- Observadas via radiotelescópios e radioespectrógrafos na faixa entre 10 e 8.000 MHz
- Importantes nos estudos das estruturas magnéticas, sua variabilidade e evolução

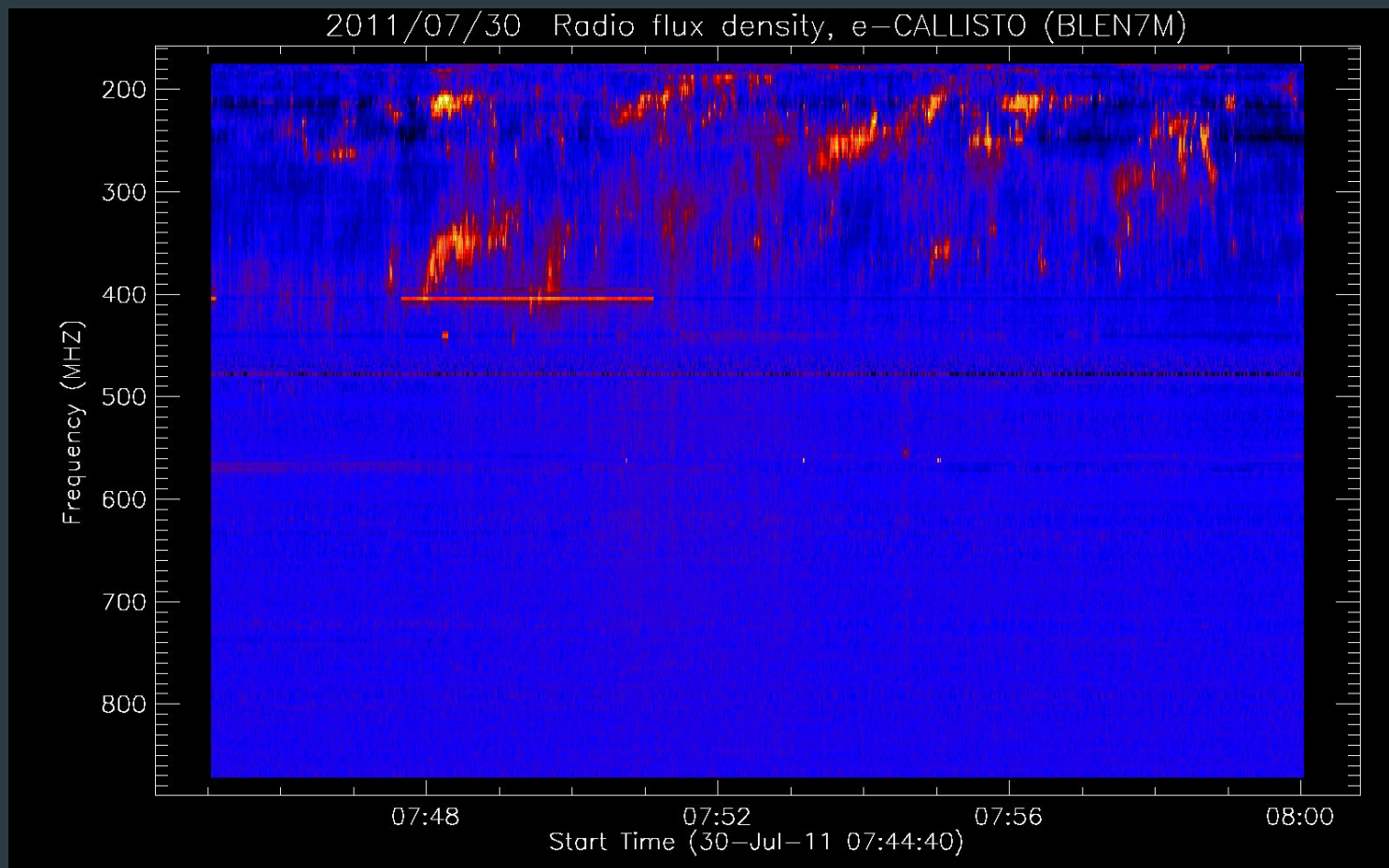


Fonte: adaptada de Warmuth e Mann (2004).

REVISÃO: EMISSÕES TIPO I - TEMPESTADES DE RUÍDO

- ▶ Características
 - ▶ Banda estreita (alguns MHz) e curta duração (1 s).
 - ▶ Compõem as correntes de tipo I e tempestades de ruído em rádio de longa duração (horas a dias)
 - ▶ Ondas métricas $\nu \lesssim 300$ MHz
 - ▶ Formam correntes de emissões contínuas
 - ▶ Assinaturas de reorganizações coronais

REVISÃO: TEMPESTADES DE RUÍDO

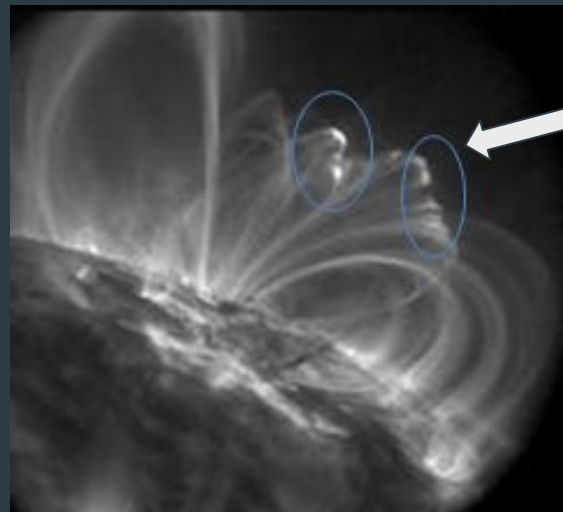


Espectro dinâmico de uma tempestade de ruído, registrada pelo espectrógrafo BLEN7M da rede e-CALLISTO, em 30 de julho de 2011 (~ 07:45 - 08:00 UT).

Fonte: MONSTEIN, 2011.

REVISÃO: TEMPESTADES DE RUÍDO

- ▶ Possível associação com a turbulência do plasma e propagação de irregularidades e ondas
- ▶ Definição “Emissões de turbulência de baixa frequência” (BENZ, 2002)
- ▶ Há muita discussão e controvérsia sobre os processos físicos e mecanismos responsáveis pelas emissões (BENZ, 2002)



Dinâmica turbulenta espaço temporal que pode influenciar no padrão da radio emissão? (Rosa et al, 2010)

REVISÃO: ANÁLISE DE SÉRIES TEMPORAIS E FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS

- ▶ Séries Temporais Canônicas
 - ▶ Ruídos $1/f^{\beta}$
 - ▶ Turbulentas
 - ▶ Caóticas
- ▶ Ferramentas Computacionais
 - ▶ DFA
 - ▶ PSD
 - ▶ GPA

REVISÃO: ANÁLISE DE SÉRIES TEMPORAIS E FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS

► Séries Temporais Canônicas

Ruídos Estocásticos do tipo $1/f^p$

- 1) “*White Noise*” ($1/f^0$) - Ruído Branco.
- 2) “*Pink Noise*” ($1/f^1$) - Ruído Rosa.
- 3) “*Red Noise*” ($1/f^2$) - Ruído Vermelho.

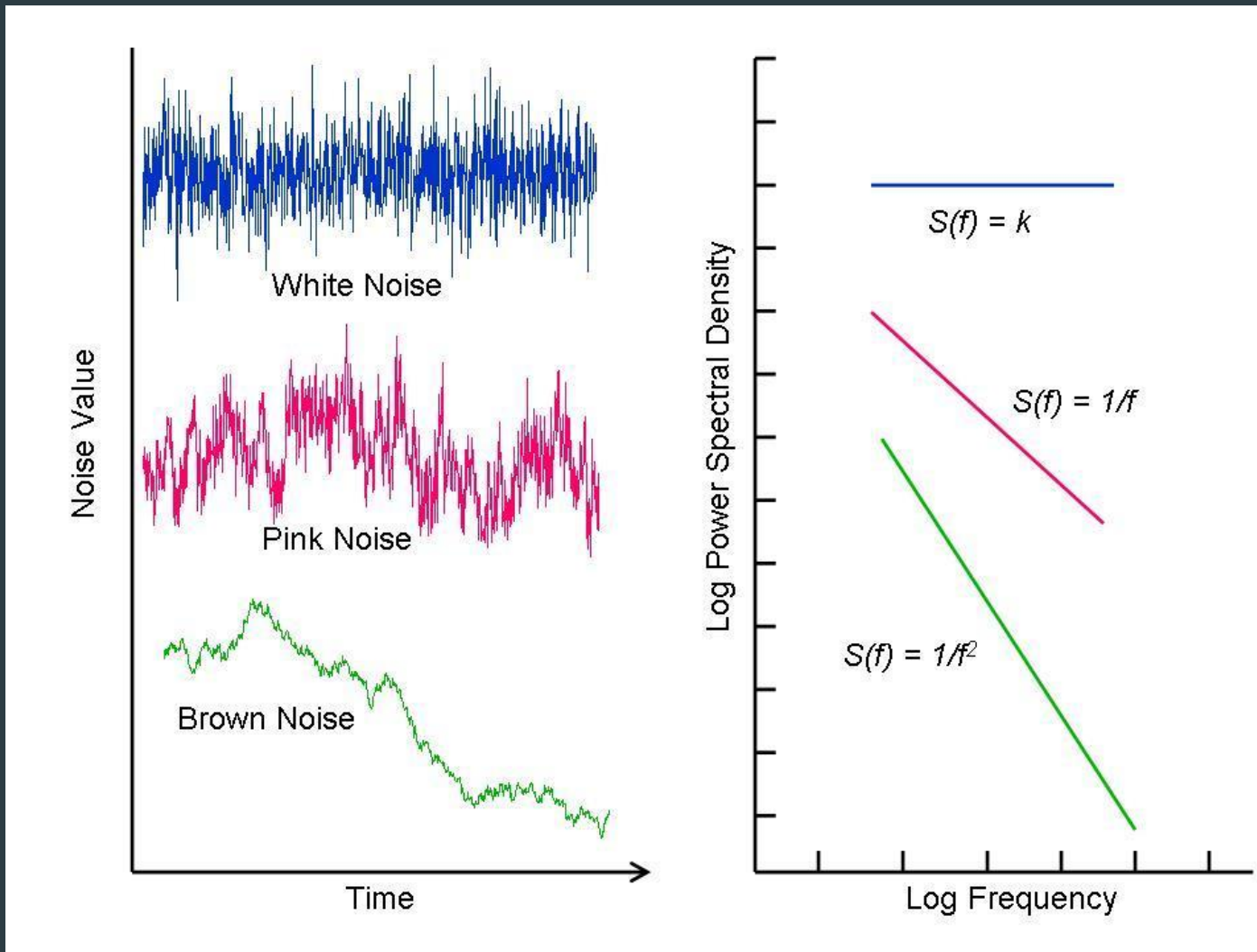
Caóticas

- 4) Mapa logístico. $k = 4$. $A_0 = 0,0001$. (1D)
- 5) Mapa de Hénon. $a = 1,4$ e $b=0,3$. (2D)
- 6) Circuito Eletromagnético de Chua. (3D)

Turbulentas

- 7) Espectro $K^{(-5/3)}$ de Kolmogorov (K41), o qual varia entre 1.64 e 1.68.
(cascata homogênea de distribuição de energia)
- 8) Espectro pModel: desvios do K41 devido à turbulência não-homogênea.

REVISÃO: SÉRIES DE RUÍDOS $1/f$

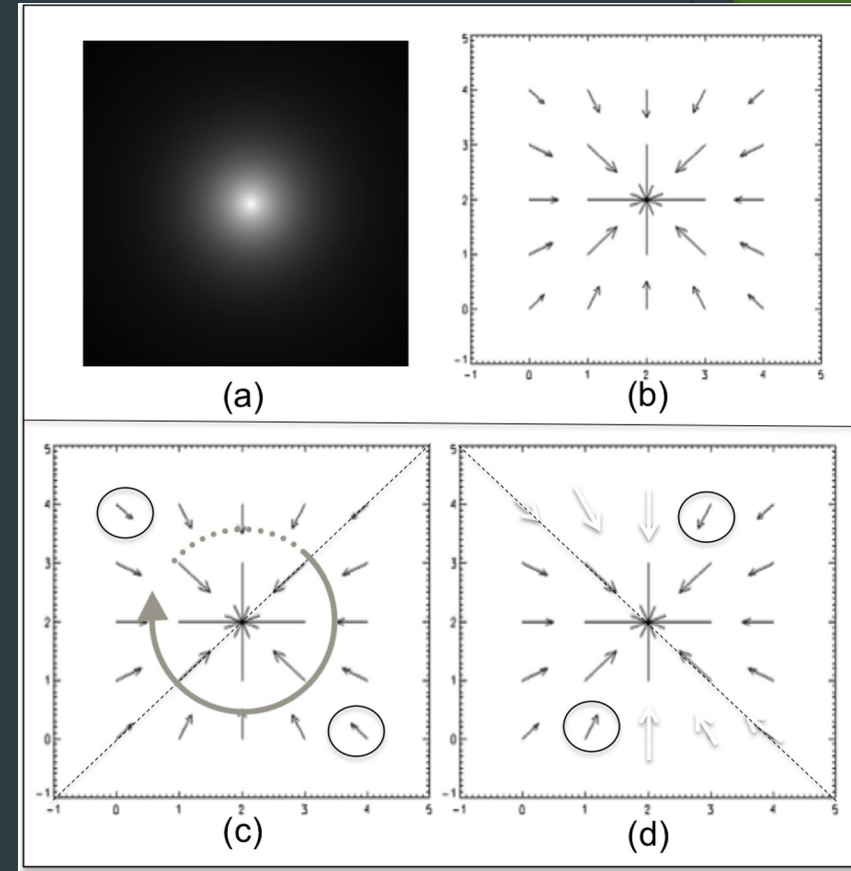


Ruídos $1/f$

Fonte: (WARD AND GREENWOOD, 2007).

REVISÃO: FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS - GPA

- ▶ Complexidade do padrão espacial 2D
 - ▶ Grau da assimetria bilateral em relação aos 4 eixos de simetria (coeficiente de assimetria bilateral)
 - ▶ Calculado sobre o campo gradiente de uma matriz
 - ▶ Padrões
 - ▶ Processos dinâmicos (reação-difusão, caos espaço-temporal e turbulência)
- ▶ (ROSA; SHARMA; VALDIVIA; ROSA; SHARMA; VALDIVIA; 1998, 1999) (ROSA ET AL., 2018)

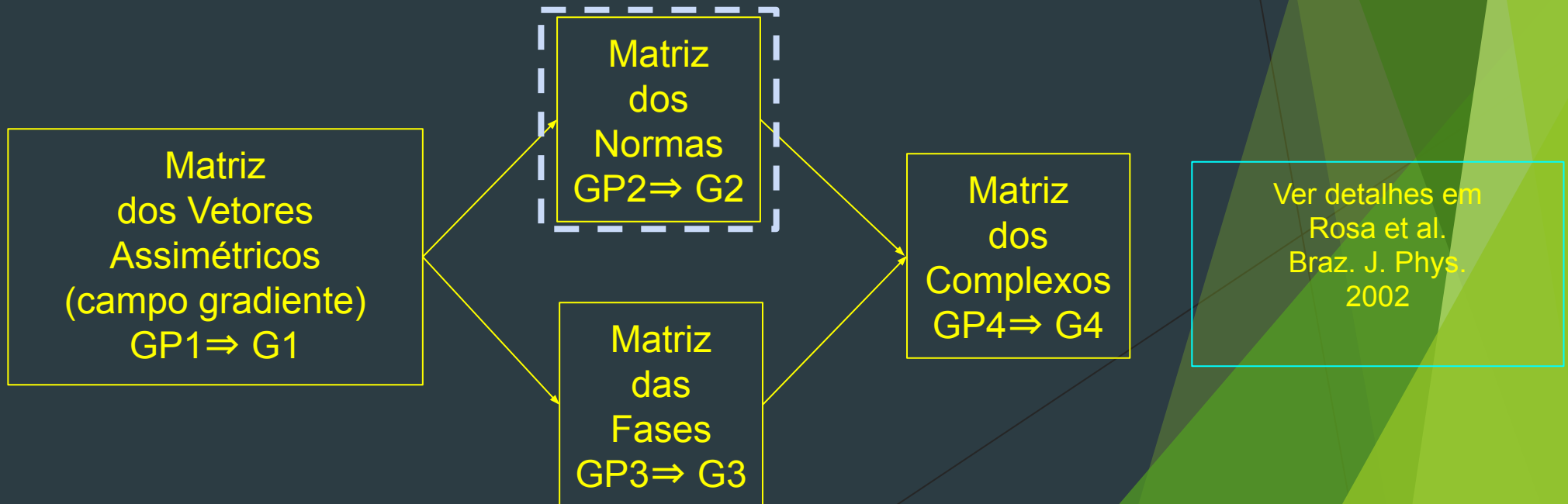
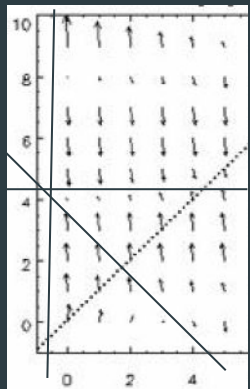


a) Padrão simétrico gerada de uma função Gaussiana 2D (6x6); b) Padrão gradiente obtido; c) e d) Passos para remover os pares de vetores simétricos

Fonte: (ROSA ET AL., 2018.)

REVISÃO: GPA

- ▶ Cálculo da Assimetria Gradiente a partir de uma matriz (Gradient Pattern-GP)
 - ▶ ∇M - Composição dos seguintes padrões gradiente (GP):
 - ▶ GP1 - Cálculo do parâmetro G_1 (1º Momento Gradiente)
 - ▶ GP2 - Cálculo do parâmetro G_2 (2º Momento Gradiente)
 - ▶ GP3 - Cálculo do parâmetro G_3 (3º Momento Gradiente)
 - ▶ GP4 - Cálculo do parâmetro G_4 (4º Momento Gradiente)



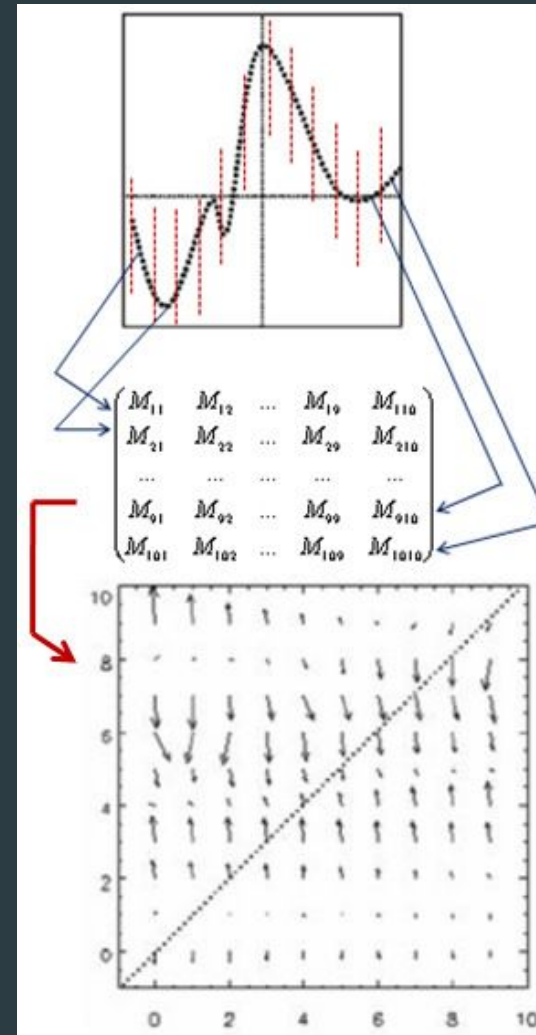
REVISÃO: GPA - G_2 - 2º MOMENTO GRADIENTE

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

- ▶ V = quantidade total de vetores gradiente
- ▶ V_A = quantidade de vetores assimétricos após a remoção dos pares simétricos
- ▶ $\sum_i^{V_A} v_i$ = soma vetorial assimétrica
- ▶ $|v_i|$ = ith norma vetorial assimétrica
- ▶ Altos valores significam que a grade gradiente possui muitos vetores assimétricos desalinhados
 - ▶ Alta diversidade de valores na matriz GP2

REVISÃO: GPA EM SÉRIES TEMPORAIS

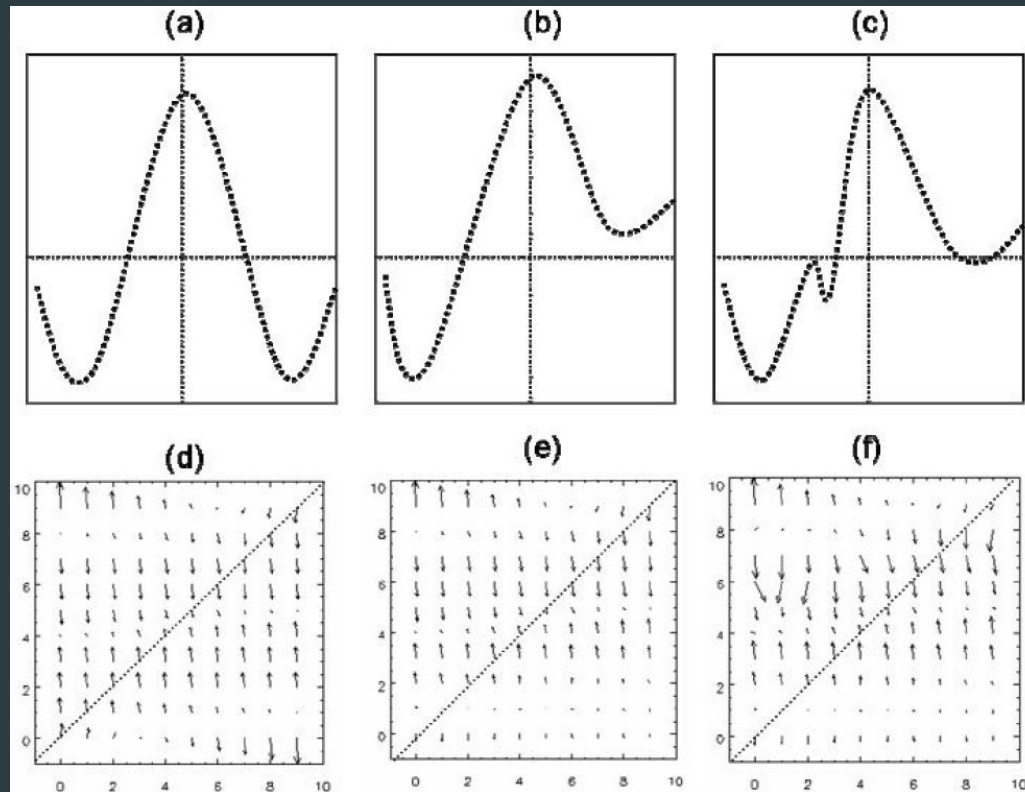
- ▶ Cálculo da Assimetria Gradiente para Séries Temporais
- ▶ Mapeamento de Série temporal para Matriz



Fonte: (DANTAS, 2009)

REVISÃO: GPA em séries temporais

- ▶ Cálculo da Assimetria Gradiente para Séries Temporais
 - ▶ Perfis de Amplitudes (100 pontos)



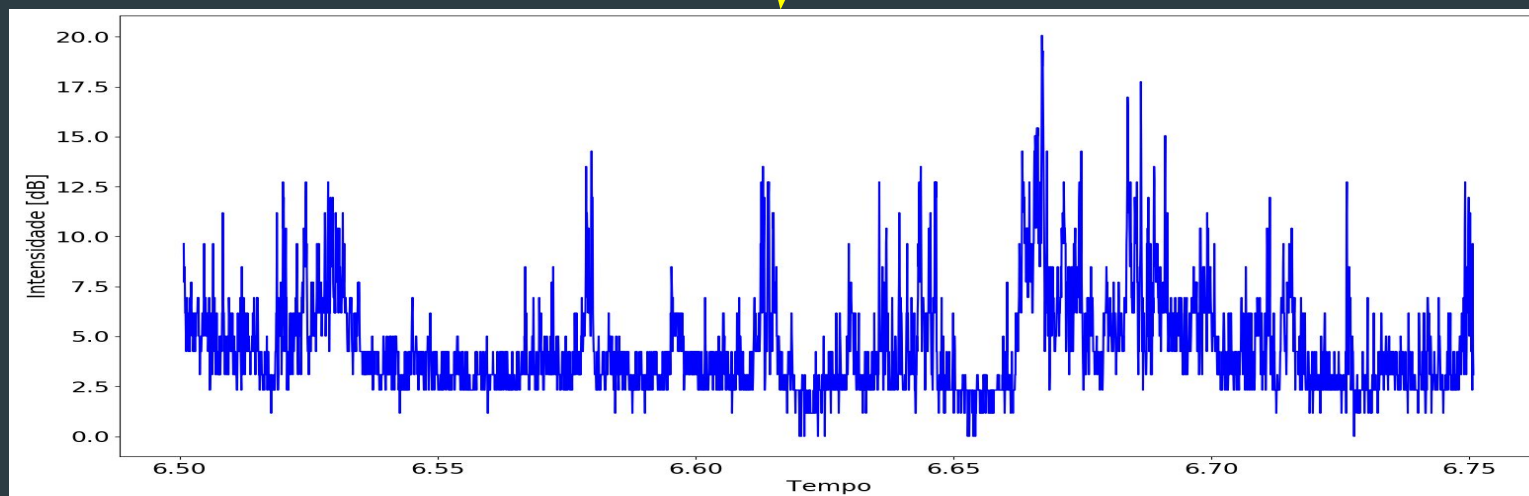
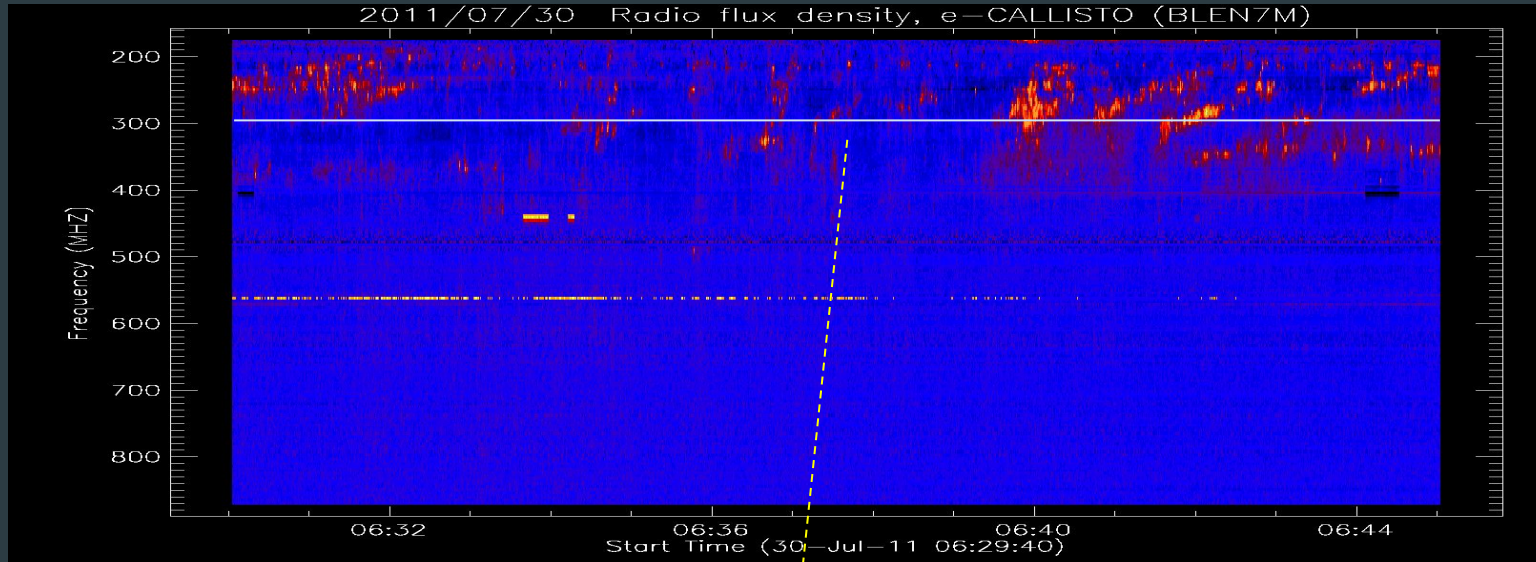
Fonte: (DANTAS, 2009)

METODOLOGIA

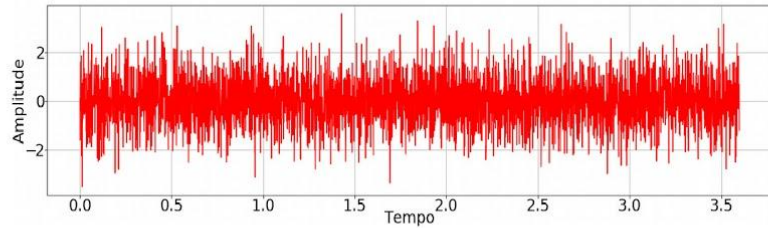
SELEÇÃO DOS DADOS DE TEMPESTADES DE RUÍDO

- ▶ Seleção de 8 séries temporais Tipo I (3600 pontos), 15 minutos cada
 - ▶ Provenientes do espectrógrafo BLEN7M e armazenadas no repositório e-CALLISTO
 - ▶ Critério: eventos do tipo RNS (*Radio Noise Storms*) - Relatórios do NOAA (*Solar and Geophysical Event Reports*)
 - ▶ Eventos de 30/07/2011 em 8 horários diferentes
 - ▶ Maior média de intensidade entre 255 MHz e 285 MHz
 - ▶ 263,3 MHz (canal 167) para as 8 séries

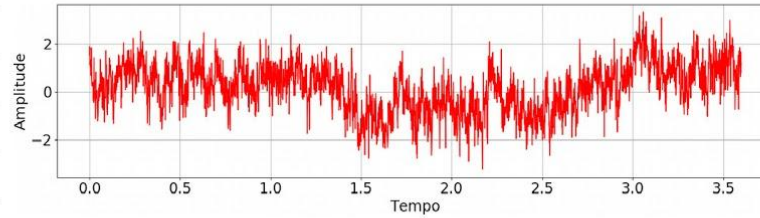
METODOLOGIA - ST SOLAR TIPO I - 30/07/2011 - 06h30 à 06h45



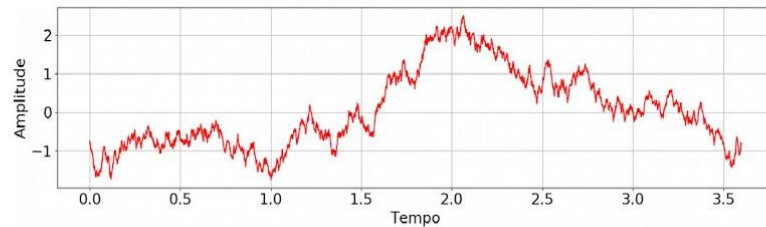
METODOLOGIA - SÉRIES CANÔNICAS



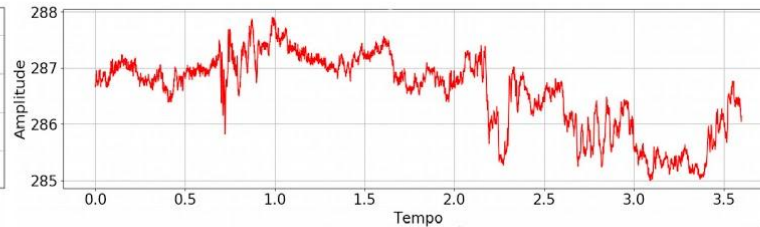
a) Série “White Noise”, com 3600 pontos.



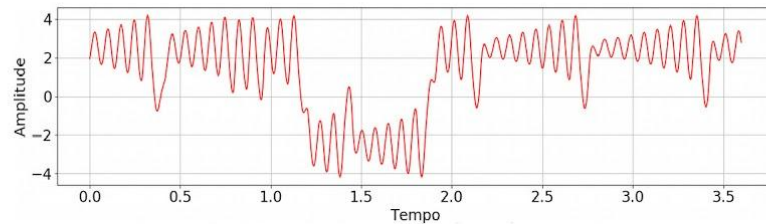
b) Série “Pink Noise”, com 3600 pontos.



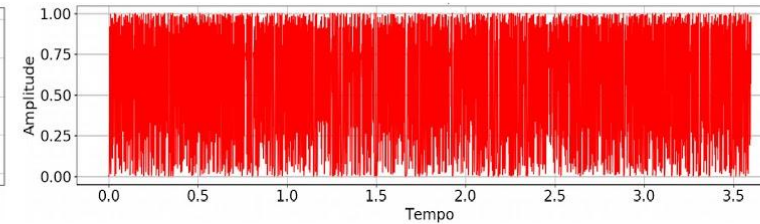
c) Série “Red Noise”, com 3600 pontos.



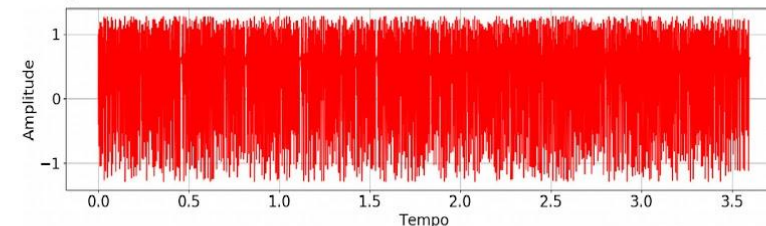
d) Série “A0-Turb6mil”, com 3600 pontos.



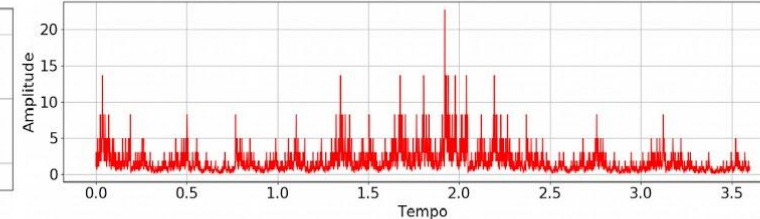
e) Série “A5-Chua-Chaos_Y1”, com 3600 pontos.



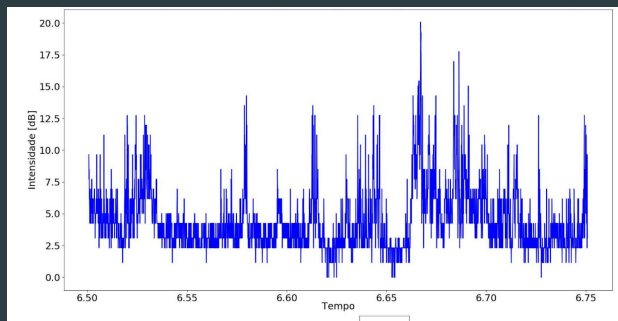
f) Série “A6-Logist”, com 3600 pontos.



g) Série “A7-Henon_x”, com 3600 pontos.

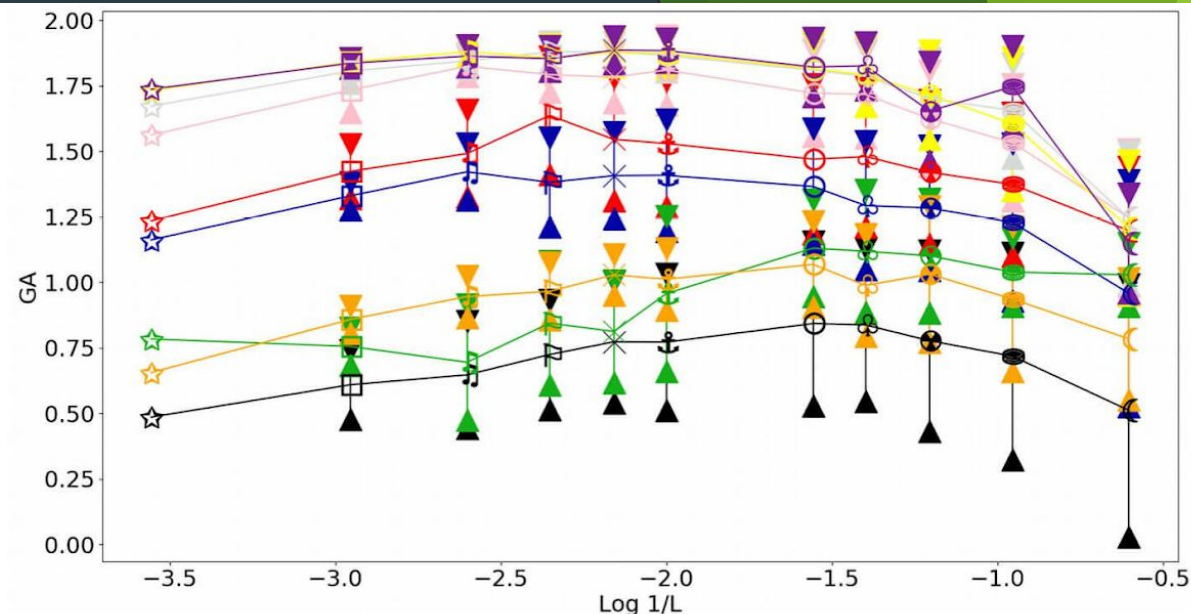
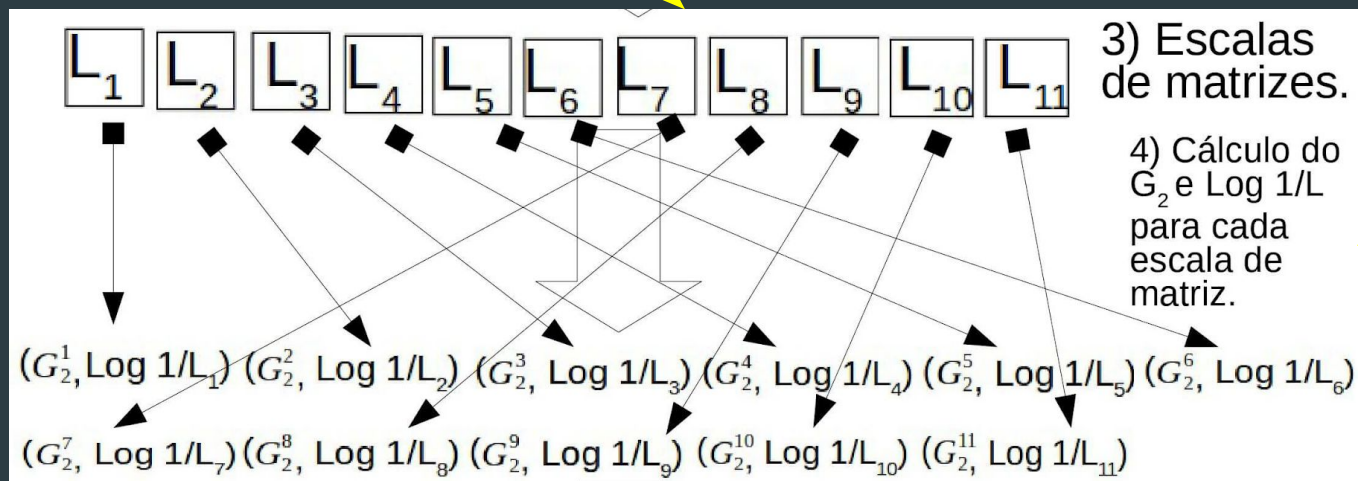


h) Série “A8-PModel”, com 3600 pontos.



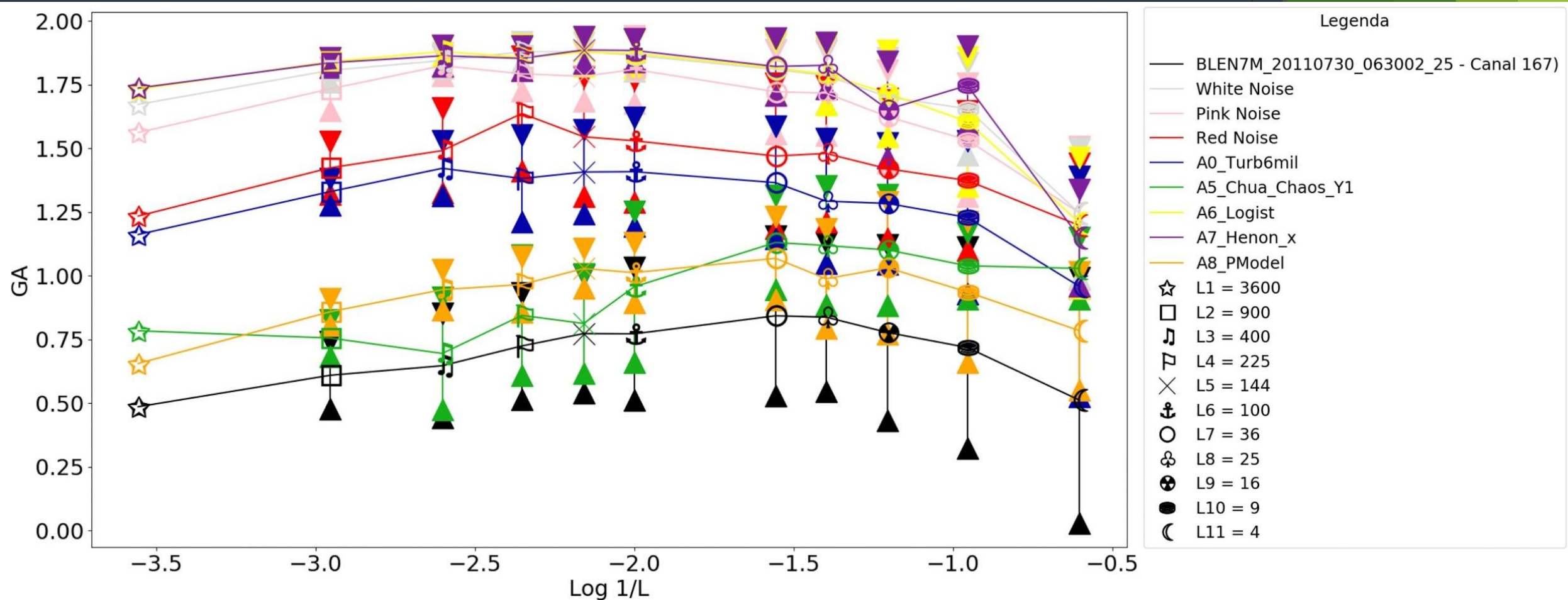
1) Input:
Série Temporal.

2) Mapeamento da
Série para várias
escalas de matrizes.

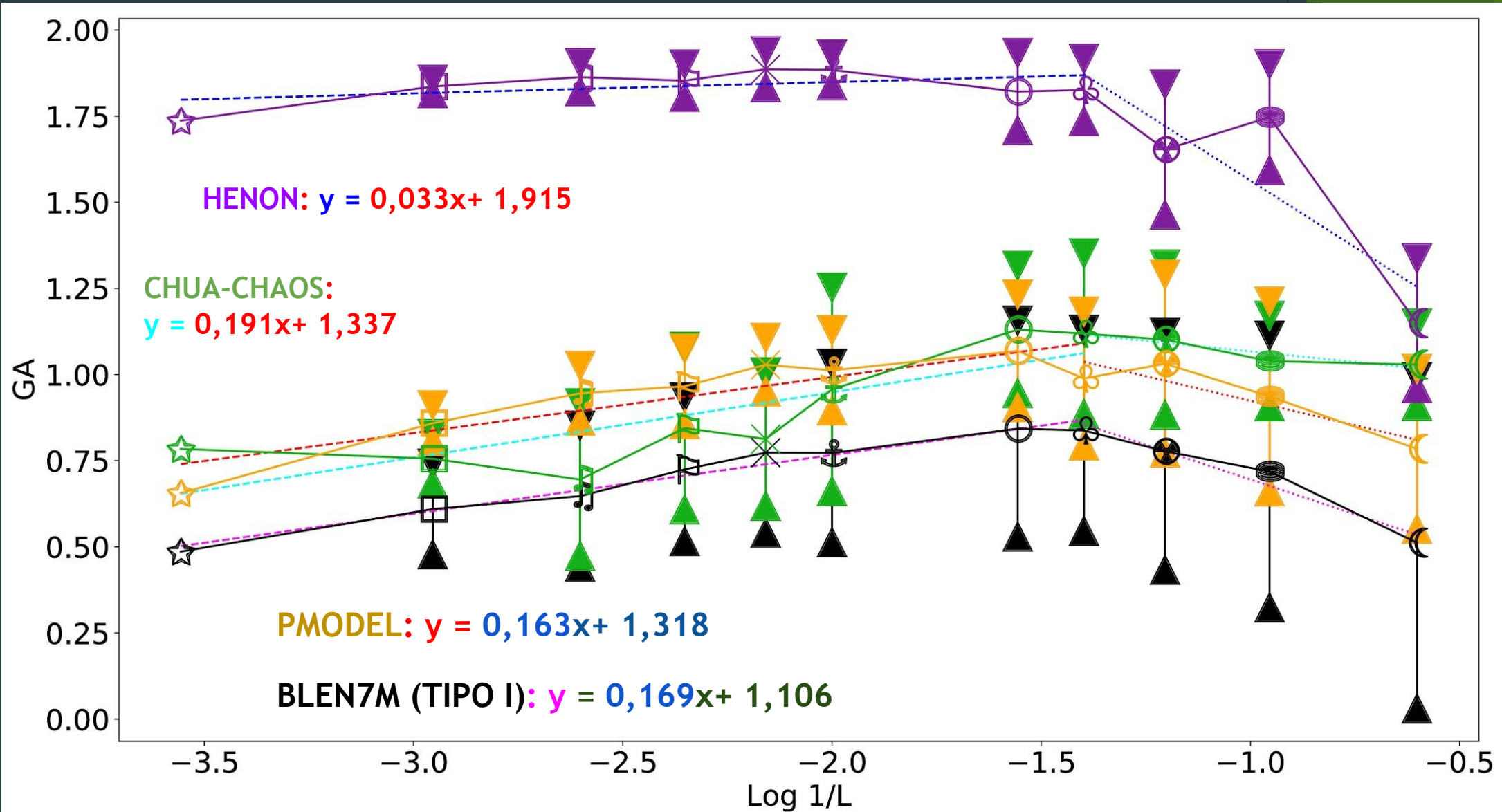


5) Plotagem do
Gráfico do
Espectro
Gradiente Via
Algoritmo
GradSpec.py
desenvolvido
neste projeto
de mestrado.

RESULTADOS E DISCUSSÕES - ESPECTRO GRADIENTE



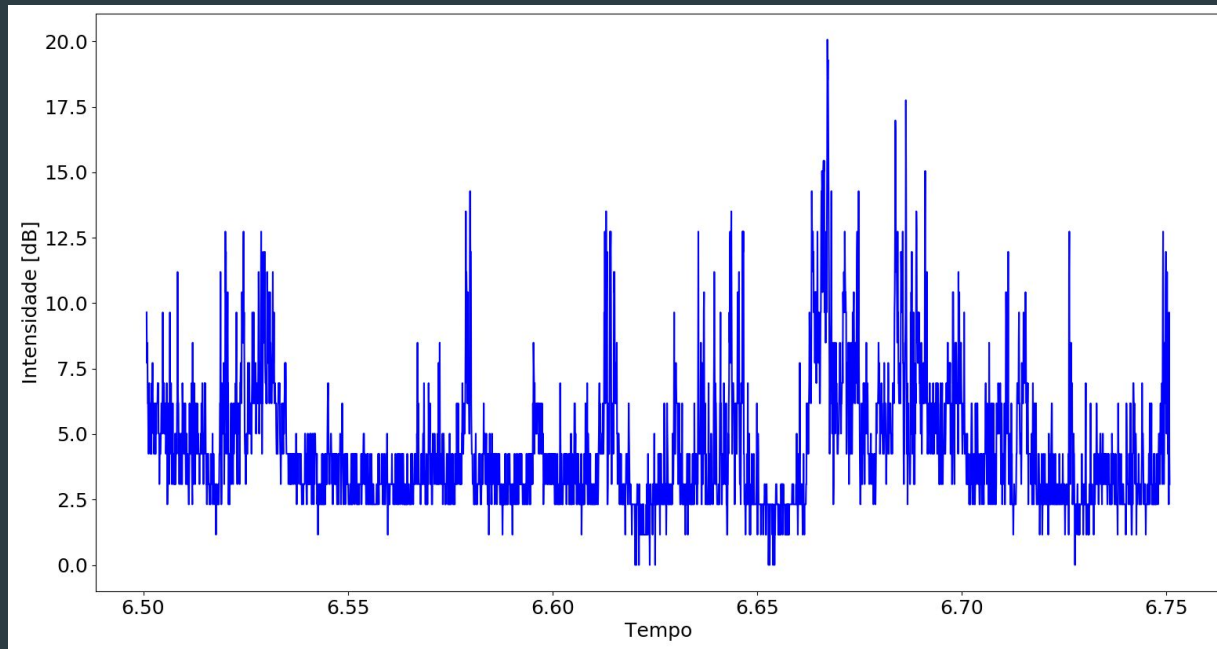
RESULTADOS E DISCUSSÕES - COMPARAÇÃO DOS ESPECTROS POR REGRESSÃO LINEAR (PARTE POSITIVA DO ESPECTRO)



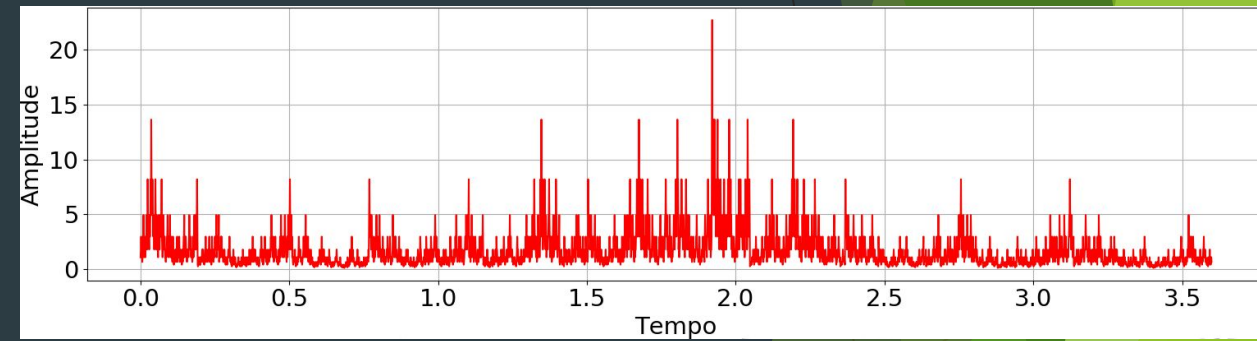
RESULTADOS E DISCUSSÕES - ESPECTRO GRADIENTE

SÉRIE TEMPORAL	MÉDIA VALORES G ₂ (L1 A L10)	MEDIANA VALORES G ₂ (L1 A L10)
"BLEN7M_20110730_063002_25" - Canal 167	0.71904990975724	0.7485
"White Noise"	1.7899300019973	1.8077
"Pink Noise"	1.7100427264008	1.7277
"Red Noise"	1.460468742013	1.475
"A0_Turb6mil"	1.3282322524356	1.3478
"A5_Chua-Chaos_Y1"	0.92400247118374	0.9008
"A6_Logist"	1.7985572673811	1.8277
"A7_Henon _x"	1.8106279768199	1.831
"A8_PModel"	0.94925141543978	0.9772

RESULTADOS - STs - SOLAR TIPO I X PMODEL



BLN7M_20110730_063002_25_canal_167



A8-PModel

CONCLUSÕES

- ▶ “A8_PModel”: DFA, PSD e GPA mais próximos dos valores das séries Tipo I
- ▶ DFA e PSD do “Pink Noise” se aproxima mais dos valores das séries tipo I, mas resultado não é robusto devido a GPA ser mais eficaz para análise de séries curtas
- ▶ Regressão linear no espectro gradiente (L1 a L8):
 - ▶ “BLEN7M_20110730_063002_25” - Canal 167:
 $y = 0,1699x + 1,1063$
 - ▶ “A8_PModel”:
 $y = 0,1625x + 1,3178$

CONCLUSÕES

- ▶ Com base nos resultados, o espectro gradiente via G2 é, portanto, uma nova técnica viável para análise de séries temporais, incluindo dados solares em ondas métricas
- ▶ Como sugerido pela teoria, o espectro gradiente indicou o processo de turbulência nao-homogenea (pModel) como o mais plausível, dentre os modelos de sinais testados neste trabalho, como o processo responsável pelas flutuações observadas nos solar storms do tipo I.
- ▶ Confirmação da vantagem do GPA, prevista por Assireu et al. (2002) sobre as demais técnicas para séries curtas

TRABALHOS FUTUROS

- ▶ Aumentar número de amostras de séries temporais de radioemissões solares Tipo I com maior variedade e quantidade de séries temporais relacionadas à turbulência
- ▶ Testar novos modelos de sinais incluindo hibridização entre séries temporais turbulentas e caóticas (A5_Chua-Chaos_Y1 x A8_PModel), além de outras.
- ▶ Refinar o cálculo do índice espectral gradiente como atributo de classificação.

TRABALHOS FUTUROS NO CONTEXTO DE CLIMA ESPACIAL (ENVOLVENDO MUITOS SINAIS E PREVISÃO DE REGIMES COMPLEXOS)

- ▶ Métodos de aprendizagem supervisionada em Inteligência Artificial, como as Redes Neurais Artificiais (ANNs) e Máquinas de Vetores de Suporte (SVM) (JIANG; CHEN; LIU, 2016) - TÉCNICAS TRADICIONAIS.
- ▶ 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 prever a evolução de estados de sistemas complexos de uma maneira classificativa, abordagem esta que demonstra que as técnicas sugeridas supera as técnicas tradicionais.

DOUTORADO - DADOS

- ▶ Dataset relacionado à:
 - ▶ (i) atividade solar conhecida como tempestades de ruído (*noise storms*) e o efeito do flare geofetivo associado à elas, no:
 - ▶ (ii) Conteúdo Eletrônico Total (*Total Electron Content* - TEC) da ionosfera terrestre
 - ▶ Os dados de TEC serão obtidos do NOAA, EMBRACE-INPE e CITEUC-OGA-Univ. Coimbra (Portugal)
 - ▶ Paradigma de detecção baseado no GPS
 - ▶ Séries temporais de explosões solares de rádio (na faixa > 100 MHz), cuja detecção automática esteja validada por técnicas estatísticas

DOUTORADO

- ▶ **ESTUDO DE VIABILIDADE DO SISTEMA EMBARCADO PARA MONITORAMENTO AUTOMÁTICO DO CLIMA ESPACIAL NO CONTEXTO DE CUBESAT E INTERNET DO ESPAÇO (INTERNET OF SPACE - IoS)**
- ▶ Cooperação entre o Laboratório Associado de Computação e Matemática aplicada - LABAC/INPE e o Centro de Investigação da Terra e do Espaço (CITEUC), sediado no Observatório Geofísico e Astronômico (OGA) - CITEUC-OGA/UC
- ▶ Responder no contexto de Tese de Doutorado em Computação Aplicada: “Qual é o nível de viabilidade tecnológica para embarcar softwares de aprendizagem de máquina para analisar dados solares e ionosféricos, no contexto de clima espacial, diretamente no espaço?”.

DOUTORADO - *SOFTWARES*

- ▶ Serão utilizados 3 algoritmos em Python, de análise de dados, contendo as implementações das seguintes técnicas:
 - ▶ (i) Gradient Spectral Analysis (GSA)
 - ▶ (ii) Multifractal Detrended Fluctuation Analysis (MFDFA)
 - ▶ (iii) Long-Short Term Memory (LSTM)
 - ▶ RNN implementada em TensorFlow > Keras
 - ▶ Largamente utilizada como técnica de Deep Learning para previsão de séries temporais
 - ▶ Principalmente aquelas relacionadas ao clima espacial
 - ▶ Os 3 algoritmos ((i), (ii) e (iii)) serão integrados em uma única plataforma, denominada de “LABAC-STSA01” (LABAC Smart Time Series Analysis 01)

DOUTORADO - PIPELINE > WORKFLOW

- ▶ Configuração composta pelos seguintes módulos
 - ▶ (1) Aquisição e processamento automático de dados solares;
 - ▶ (2) Análise automática espectral, via MFDFA, e classificação da geofetividade, via GSA, da rádio explosão solar;
 - ▶ (3) Aquisição e processamento de dados de TEC;
 - ▶ (4) Previsão, via LSTM, da evolução TEC com base na geofetividade da rádio explosão solar;
 - ▶ (5) Envio da previsão para o EMBRACE/INPE e CITEUC-OGA/Univ. de Coimbra.

GOOGLE COLAB

- ▶ Link para o código que foi salvo no GitHub:



- ▶ Vamos para o código.

OBRIGADO!!!