

Universidade do Vale do Paraíba  
Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento

ZULEIKA AUXILIADORA DA LUZ SODRÉ

**INVESTIGAÇÃO DE EMISSÕES SOLARES TIPO I ASSOCIADAS A  
TEMPESTADES DE RUÍDO EM ONDAS MÉTRICAS**

São José dos Campos, SP

2017

**ZULEIKA AUXILIADORA DA LUZ SODRÉ**

**INVESTIGAÇÃO DE EMISSÕES SOLARES TIPO I ASSOCIADAS A  
TEMPESTADES DE RUÍDO EM ONDAS MÉTRICAS**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Física e Astronomia, como complementação dos créditos necessários para a obtenção do título de doutor em Física e Astronomia.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Carlos Rocha Fernandes

São José dos Campos, SP

2017

P495e

Sodré, Zuleika Auxiliadora da Luz.

INVESTIGAÇÃO DE EMISSÕES SOLARES TIPO I ASSOCIADAS A TEMPESTADES DE RUÍDO EM ONDAS MÉTRICAS. / ZULEIKA AUXILIADORA DA LUZ SODRÉ. Francisco Carlos Rocha Fernandes . São José dos Campos, 2017.

99p.

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de **Física e Astronomia** do Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento da Universidade do Vale do Paraíba, 2017.

1.Tempestade de ruído (RNS). 2.região ativa (AR) 3.flares 4.campo magnético fotosférico 5.espectro de potência

CDU 000.000

Autorizo exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta Tese de Doutorado, por processos fotocopiadores ou transmissão eletrônica, desde que citada a fonte.

Assinatura do aluno:

Data: 30 de março de 2017

# ZULEIKA AUXILIADORA DA LUZ SODRÉ

## INVESTIGAÇÃO DE EMISSÕES SOLARES TIPO I ASSOCIADAS A TEMPESTADES DE RUÍDO EM ONDAS MÉTRICAS

Tese aprovada como requisito parcial à obtenção do grau de Doutor em Física e Astronomia, 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:

Presidente: (UNIVAP)

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Alan Prestes

Orientador: (UNIVAP)

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Francisco C. R. Fernandes

Membro Interno: (UNIVAP)

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Arian Ojeda González

Membro Externo: (Universidade Cruzeiro do Sul)

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Caius Lucius Selhorst

Membro Externo: (Universidade Tecnológica Federal do Paraná)

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Jean C. Santos

Prof. Dr. Leandro José Raniero

Diretor do IP&D – UNIVAP

São José dos Campos, 30 de março de 2017 (data de aprovação).

"Tenha em mente que tudo que você aprende na escola é trabalho de muitas gerações (...) Receba essa herança, honre-a, acrescente a ela e, um dia, fielmente, deposite-a nas mãos de seus filhos."

Albert Einstein

*A meu marido Francisco, a quem jamais encontrarei palavras suficientes para expressar minha gratidão. Sem seu apoio incondicional jamais teria chegado até aqui.*

## **Agradecimentos**

Primeiramente a Deus que permitiu que tudo isso acontecesse, ao longo de minha vida, e não somente nestes anos, mas que em todos os momentos é o maior Mestre que alguém pode conhecer.

A meu orientador, Prof. Dr. Francisco C.R. Fernandes, pela oportunidade na elaboração deste trabalho, pelo paciente trabalho de revisão e melhorias da redação, pela orientação, apoio, confiança, incentivo e sobretudo pela amizade nascida durante essa caminhada, a qual desejo sinceramente que se torne eterna.

A esta universidade, seu corpo docente, em especial do IPD, direção e administração pela oportunidade de estudar em uma instituição onde o mérito e a ética se fazem presentes.

Agradeço a todos os professores por me proporcionarem o conhecimento não apenas racional, mas a manifestação do caráter e afetividade da educação no processo de formação profissional, por tanto que se dedicaram a mim, não somente por terem me ensinado, mas por terem me feito aprender. A palavra mestre nunca fará justiça aos professores dedicados aos quais sem nominar terão os meus eternos agradecimentos.

Agradeço a minha mãe, Célia, heroína que me deu apoio, incentivo nas horas difíceis, de desânimo e cansaço.

A meu pai, José Jairo, que apesar de todas as dificuldades me fortaleceu e que para mim foi muito importante.

Obrigada a meus irmãos e sobrinhos, que nos momentos de minha ausência dedicados ao estudo, sempre entenderam que o futuro é feito a partir da constante dedicação no presente!

Meus agradecimentos aos amigos do programa de Física e Astronomia, companheiros de trabalhos e irmãos na amizade que fizeram parte da minha formação e que vão continuar presentes em minha vida com certeza.

À CAPES e à UNIVAP que me proporcionaram a bolsa de doutorado.

Aos professores Dr. Cristiano M. Wrasse e Dr. Jean C. Santos que contribuíram para que esta Tese encontrasse um caminho para responder a principal questão aqui imposta.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado!

# INVESTIGAÇÃO DE EMISSÕES SOLARES TIPO I ASSOCIADAS A TEMPESTADES DE RUÍDO EM ONDAS MÉTRICAS

## RESUMO

Neste trabalho é apresentada a análise de tempestades de ruído, registradas pelo espectrógrafo CALLISTO-BLE7M, da Suíça. Para um melhor entendimento dos resultados obtidos, os mesmos estão separados em três Capítulos, cada um descrevendo a teoria, a metodologia, os resultados obtidos e uma conclusão. A primeira etapa investiga a evolução da região ativa NOAA 11476, observada entre 05 e 15 de maio de 2012, associada com RNS observadas no mesmo período, entre 5 e 16 de maio de 2012, totalizando um período de aproximadamente 20 horas de tempestades. Nesta etapa também é apresentado um levantamento estatístico sobre a ocorrência de RNS em dias com e sem a presença de *flares* solares em raios-X, e a duração das RNS nestas mesmas condições para os anos de 2010 a 2015. A segunda etapa relata a análise dos parâmetros das correntes do tipo I associadas com duas RNS: uma na presença de *flares* solares em raios-X e uma registrada num dia sem a presença de um *flare*. Não foram encontradas diferenças significativas na maioria dos parâmetros observacionais e físicos das RNS nos dias com e sem a ocorrência de *flares* solares em raios-X. As exceções ficaram por conta da duração, da velocidade radial e da altura da fonte. Portanto, a análise dos parâmetros mostrou que as tempestades não estão associadas diretamente aos *flares*, já que a maioria dos parâmetros não apresentou diferenças em dias com e sem a presença dos *flares*. Viu-se nas etapas anteriores que as RNS não estão ligadas diretamente aos *flares*. Por estarem associados às ARs, e a reorganização do campo magnético fotosférico ser importante na atividade dos *flares*, utilizou-se nesta etapa a análise da evolução temporal do espectro de potência magnético para identificar para quais escalas de comprimento a reorganização da AR ocorre. A partir de magnetogramas, e, considerando que a emissão tipo I é gerada pela emissão fundamental do plasma, a reorganização das escalas foi investigada como a possível responsável pelo processo de manutenção da RNS. O estudo mostrou que: o espectro tem inclinação maior que  $\frac{5}{3}$  indicando a possibilidade de transferência de energia de pequenas para grandes estruturas; o aumento do valor do índice da lei de potência provoca uma redistribuição da energia ao longo do espectro de potência; a reorganização começa para valores  $\approx 0,03 R_s$  acima da fotosfera; a reorganização começa logo após o início da RNS ( $\approx 10$  min.) e continua mesmo após o término da mesma ( $\approx 1h30min.$ ); a dissipação é significativa para números de onda menores que 3 Mm e a evolução temporal do espectro de dissipação revela que a potência aumentou antes do início da RNS para uma ampla faixa de número de ondas, inclusive pequenos números de onda (grandes estruturas), indicando um aumento na dissipação em grandes escalas, onde mais energia está disponível. Diante dos resultados, postula-se que a energia disponível resultante da reorganização do campo magnético fotosférico, com a respectiva dissipação dessa energia através da cascata, chegando a alturas coronais, pode ser um dos agentes responsáveis por manter a aceleração dos elétrons durante as RNS.

**Palavras-chave:** Tempestade de ruído (RNS), região ativa (AR), *flares*, campo magnético fotosférico, espectro de potência.

## ABSTRACT

This work presents the analysis of the radio noise storms (RNS) recorded by the CALLISTO-BLE7M spectrograph from Switzerland. For a better understanding of the results here obtained, they are separated into three Chapters, each one describing a theory, a methodology, the results obtained and a conclusion. The first chapter investigates the evolution of the active region (AR) NOAA 11476, observed between May 05 and 15, 2012. This active region was associated with a RNS observed during the same period, between May 5 and 16, 2012, having a total duration of approximately 20 hours. In this chapter we also present a statistical survey on the occurrence of RNS in days with and without the presence of solar flares on X-rays, and the duration of RNS in these same conditions for the years 2010 to 2015.

As for the evolution of AR and the occurrence of RNS, the following conclusion was reached: the magnetic complexity does not seem to have a direct influence on the occurrence or not of storms, but its evolution in time, which may cause new reconnections, and these in turn, sustain the acceleration of the electrons, sustenance the storm. In the statistical survey as conclusions were: in days with a presence of *flares* in X-rays a greater number of storms (seven times more, on average); in the same analysis it was found that storms have a longer duration (on average, two and a half times) when the occurrence of *flares*.

The second chapter reports the analysis of the parameters of the chains of type I associated with two RNS: one in the presence of X-ray solar *flares* and one recorded on a day without the presence of a *flare*. We did not find significant differences in most of the observational and physical parameters of the RNS in the days with and without the occurrence of solar *flares* in X-rays. The exceptions were the duration, radial velocity and height of the source. Therefore, the analysis of the parameters showed that the storms aren't directly associated to the *flares*, since most of the parameters didn't show differences in days with and without the presence of *flares*. It has been seen in the previous steps that the RNS are not linked directly to the *flares*. Because they are associated with ARs, and the reorganization of the photospherical magnetic field is important in the activity of the *flares*, the analysis of the temporal evolution of the magnetic power spectrum was used in this step to identify for which length scales the reorganization of the AR occurs. From magnetograms, and considering that the type I emission is generated by the fundamental emission of plasma, the reorganization of the scales was investigated as the possible responsible for the maintenance process of the RNS. The study showed that: the spectrum has a slope greater than  $\frac{5}{3}$  indicating the possibility of energy transfer from small to large structures; the interval at which the spectrum shows a very similar power law behavior, and its slope (the power index) can be defined, to be between  $\approx 0.12$  and  $3.0 \text{ Mm}^{-1}$ ; the increase in the value of the power law index causes a redistribution of energy throughout the power spectrum; the rearrangement begins at values  $\approx 0.03 R_s$  above the photosphere; the reorganization begins immediately after the start of the RNS ( $\approx 10 \text{ min.}$ ) and continues even after the end of the same ( $\approx 1\text{h}30\text{min.}$ ); this reorganization occurs mainly at values of  $\kappa$  of less than  $0.2 \text{ Mm}^{-1}$  associated with length scales greater than  $\approx 31.4 \text{ Mm}$  ( $0.04 R_s$ ) above the photosphere; the dissipation is significant for wave numbers smaller than  $3 \text{ Mm}$  and the temporal evolution of the dissipation spectrum reveals that the power increased before the start of the RNS for a wide range of wave numbers, including small wave numbers (large structures), indicating an increase in dissipation at large scales where more energy is available. In view of all these results, it is postulated that the available energy resulting from the reorganization of the photospheric magnetic field, with the respective dissipation of this energy through the cascade reaching coronal heights, can be one of the agents responsible for maintaining the acceleration of the electrons during the RNS.

**Keywords:** Radio Noise Storms (RNS), active region (AR), flares, photospheric magnetic fields, power spectrum.

## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1	Regiões do interior solar. A classificação da região é feita de acordo com os diferentes processos que ocorrem em cada uma das regiões. . . . . 19
2	Observações da Fotosfera (4500 Å), Cromosfera (304 Å), Região de Transição (304 e 171 Å) e Coroa (171 e 211 Å), feitas pelo <i>Atmospheric Imaging Assembly</i> (AIA) em 02/11/2016. . . . . 20
3	Distribuição das manchas solares. Painel superior: latitude das manchas solares ao longo do tempo. Painel inferior: número de manchas ao longo dos ciclos, evidenciando a periodicidade aproximada de 11 anos. . . . . 25
4	Representação esquemática do modelo de dínamo. Partindo de um campo poloidal limitado às regiões polares (a), os segmentos de linha de campo situados no equador são arrastados mais depressa do que os outros, resultando num alongamento equatorial e no aparecimento de um campo toroidal (b). Originam-se, assim, campos muito concentrados, intensos e de aspectos opostos de um hemisfério para outro (c). . . . 26
5	Exemplos da complexidade magnética das manchas solares. Nos painéis superiores são mostradas imagens em EUV e nos inferiores, magnetogramas. . . . . 28
6	Exemplo espectro dinâmico com representação eixo frequência invertido. . . . . 32
7	Espectro dinâmico de emissões em ondas métricas: da esquerda para a direita superior: emissões tipo I, tipo II e tipo III. Na parte inferior: emissões tipo IV e tipo V. 33
8	Espectro dinâmico ilustrando um burst tipo I, uma corrente tipo I e uma tempestade de ruído. . . . . 36
9	Modelo do mecanismo de emissão de tempestades tipo I. Um novo arco magnético move-se num campo magnético coronal pré-existente. Os campos novo e antigo serão separados por uma região de alta densidade de corrente. Onde os campos são fortes, a densidade de corrente atingirá o valor crítico para a geração da turbulência íon-acústica que em última instância resulta na emissão de radiação eletromagnética. 38
10	Modelo da geometria da região fonte de tempestades tipo I ilustrando sua estrutura colunar. . . . . 38
11	Configuração da rede e-CALLISTO, em 02 de fevereiro de 2017. Os triângulos em vermelho representam estações fornecendo dados e as estrelas, em azul, as estações que ainda não fornecem ou não mais fornecem dados. . . . . 44
12	Etapas de aquisição e disponibilização de dados dos espectrômetros da rede e-CALLISTO contendo registros de atividade solar. . . . . 45
13	Diagrama representando a disponibilização dos espectros dinâmicos da rede e-CALLISTO contendo registros de atividade solar. . . . . 45

14	Antena de 7 m de diâmetro do CALLISTO-BLEN. . . . .	46
15	Imagens do SDO exemplificando os vários comprimentos de onda registrados pelo instrumento. . . . .	48
16	Espectro dinâmico do Callisto-BLEN plotado com SunPy, utilizando a ferramenta de subtração do background. . . . .	50
17	Dados do GOES (entre 1715 UT e 1730 UT) plotado com SunPy. . . . .	50
18	Espectro dinâmico da RNS registrada pelo espectrógrafo CALLISTO-BLEN7M no dia 05 de maio de 2012 entre 06:00 e 07:00 UT. . . . .	56
19	Registros do satélite GOES 15 no dia 05 de maio de 2012 entre 05:45 e 07:00 UT. .	57
20	Magnetograma registrado pelo SDO/HMI em 05/05/2012, mostrando as ARs presentes no disco solar nesta data. . . . .	57
21	Registro do SDO/AIA em 171 Å, no dia 05/05/2012, mostrando as ARs presentes no disco solar nesta data. O quadrado em preto ressalta a NOAA 11476. . . . .	58
22	Espectro dinâmico da RNS registrada pelo espectrógrafo CALLISTO-BLEN7M no dia 10 de maio de 2012 entre 13:00 e 14:00 UT. . . . .	58
23	Registros do satélite GOES 15 no dia 10 de maio de 2012 entre 13:00 e 14:00 UT. .	59
24	Magnetogramas do disco solar e da AR 11476 em 10/05/2012 (SDO/HMI). . . . .	59
25	Imagem do disco solar e da AR 11476, registradas pelo satélite SDO/AIA em 171 Å, no dia 10/05/2012. . . . .	60
26	Espectro dinâmico da RNS registrada pelo espectrógrafo CALLISTO-BLEN7M no dia 16 de maio de 2012 entre 05:00 e 05:15 UT. . . . .	61
27	Espectro dinâmico da RNS registrada pelo espectrógrafo CALLISTO-BLEN7M no dia 16 de maio de 2012 entre 15:00 e 16:00 UT. . . . .	61
28	Registros do satélite GOES 15 no dia 16 de maio de 2012 entre 05:00 e 16:00 UT. .	62
29	Magnetogramas do disco solar e da AR 11476 em 16/05/2012 (SDO/HMI). . . . .	62
30	Imagem do disco solar e da AR 11476, registradas pelo satélite SDO/AIA em 171 Å, no dia 16/05/2012. . . . .	63
31	Espectro dinâmico esquematizado de uma corrente tipo I ilustrando a determinação dos parâmetros observacionais: instantes de tempo de início ( $t_i$ ) e de fim ( $t_f$ ), duração total da corrente ( $\Delta t$ ), frequências inicial ( $f_i$ ) e final ( $f_f$ ), frequência central ( $f_c$ ) e largura de banda em frequência ( $\Delta f$ ). . . . .	66
32	Espectro dinâmico da RNS registrada pelo espectrógrafo CALLISTO-BLEN7M no dia 07 de maio de 2011 entre 05:00 e 05:30 UT. . . . .	68
33	Registros do satélite GOES 15 no dia 07 de maio de 2011 entre 00:00 e 06:00 UT. .	69
34	Espectro dinâmico da RNS registrada pelo espectrógrafo CALLISTO-BLEN7M no dia 01 de agosto de 2011 entre 18:00 e 18:30 UT. . . . .	69
35	Registros do satélite GOES 15 no dia 01 de agosto de 2011 entre 00:00 e 10:00 UT.	70
36	Duração e Largura de banda . . . . .	71

37	Deriva em frequência e Velocidade Radial . . . . .	72
38	Altura da Fonte e Campo Magnético . . . . .	72
39	Espectro dinâmico da RNS registrada pelo espectrógrafo CALLISTO-BLEN7M no dia 12 de agosto de 2012 entre 14:08 e 15:35 UT. . . . .	76
40	<i>Flares</i> B8.1(entre 13:28 e 13:44 UT) e B7.9 (entre 13:46 e 13:57 UT) registrados pelo satélite GOES 15 no dia 12/08/2012. . . . .	76
41	(esquerda) Imagem do SDO/AIA (171Å) observada no dia 12 de agosto às 14:07:47 UT, antes do início da RNS. O retângulo branco destaca a AR 11542. (direita) Detalhes da AR 11542, evidenciando a complexidade da referida região ativa. . . .	77
42	Distribuição do campo magnético fotosférico da AR 11542, dia 12/08/2012 às 11:00:39 UT. . . . .	77
43	Espectro de potência magnético (1D) da AR 11542. A linha vermelha representa a lei de potência com o ajuste do índice de potência calculado ( $\alpha$ ), já a linha pontilhada em preto, representa o ajuste da lei de potência com $\alpha = \frac{5}{3}$ . . . . .	78
44	Evolução temporal do espectro de potência (diferença de $t = 0$ ) para a AR 11542. A barra colorida à direita dá a escala das mudanças de potência normalizadas. A linha vertical à esquerda, representa o horário do término de um flare e início do outro (ver Figura 19), e, as outras duas linhas pontilhadas, o horário de início (14:08 UT) e término (15:35 UT) da RNS. . . . .	78
45	Espectro de dissipação $\kappa^2 E(\kappa)$ em $t = 0$ , calculado do espectro de energia da Figura 22 para a região ativa 11542. . . . .	79
46	Evolução temporal do espectro de dissipação (diferença de $t = 0$ ) para a AR 11542. A barra colorida à direita dá a escala das mudanças de potência normalizadas. A linha vertical à esquerda, representa o horário do término de um flare e início do outro (ver Figura 19), e, as outras duas linhas pontilhadas, o horário de início (14:08 UT) e término (15:35 UT) da RNS. . . . .	80

## LISTA DE TABELAS

Pág.

1	Características de altura, temperatura (T), densidade ( $\eta$ ), campo magnético (B) e a razão entre a pressão magnética ( $P_M$ ) e a pressão do gás ( $P_G$ ) ( $\beta$ de plasma = $\frac{P_G}{P_M}$ ) para o Sol calmo. Na Tabela UA é unidade astronômica, ou seja, aproximadamente a distância média entre a Terra e o Sol. . . . .	21
2	Classificação das regiões ativas conforme a complexidade das manchas solares. . . . .	28
3	Classificação de importância $H\alpha$ para os <i>flares</i> solares. Na Tabela, Área <sup>1</sup> é dado em milionésimos do hemisfério solar e Área <sup>2</sup> em graus quadrados heliocêntricos = $1,48 \times 10^{18} \text{ cm}^2$ . . . . .	29
4	Classificação raio-X para os <i>flares</i> solares. . . . .	30
5	Rádio emissões solares em ondas métricas. . . . .	33
6	Principais especificações dos instrumentos da rede e-CALLISTO. . . . .	44
7	Ocorrência de tempestades tipo I em dias com e sem <i>flares</i> solares em raios-X para os anos de 2010, 2011, 2012, 2013, 2014 e 2015. . . . .	54
8	Duração das tempestades tipo I mais longas em dias com e sem <i>flare</i> para os anos de 2010, 2011, 2012, 2013, 2014 e 2015. No ano de 2015 não foi registrada tempestade sem a presença de <i>flare</i> . . . . .	55
9	Parâmetros das regiões ativas (ARs) nos dias de tempestade tipo I mais duradoura em 2012. O número entre parênteses refere-se à classificação da NOAA para a AR, neste caso, a de maior área e com maior número de manchas solares. A área da mancha solar é milionésimos da área do disco solar. . . . .	55
10	Sumário dos resultados obtidos na investigação da região ativa NOAA 11476, região esta que atravessou o disco solar entre os dias 5 e 16 de maio de 2012: área da mancha (em milionésimos da área do disco solar), número de manchas no dia, configuração da mancha solar (Mount Wilson), número de <i>flares</i> ( <i>flare</i> mais intenso do dia), duração das tempestades. . . . .	56
11	Parâmetros observacionais das correntes associadas à tempestade mais duradoura do ano de 2011, na presença e ausência de <i>flares</i> solares em raio-X. Na Tabela, $\Delta t$ é a duração da corrente, $\Delta B$ a largura de banda e $\frac{\Delta f_c}{f_c \Delta t}$ , que aqui trataremos como $\rho$ a deriva em frequência. . . . .	70
12	Parâmetros físicos das correntes associadas à tempestade mais duradoura do ano de 2011, na presença e ausência de <i>flares</i> solares em raios-X. Na Tabela, $v_r$ é a velocidade radial, $v_r$ (mediana) a mediana da velocidade radial, B a intensidade do campo magnético e R é o raio em unidades de raios solares ( $R_s$ ) a partir da fotosfera. . . . .	71

13	Parâmetros observacionais e físicos, em termos percentuais, das correntes associadas à tempestade mais duradoura do ano de 2011, na presença e ausência de <i>flares</i> solares em raio-X. Na Tabela, $\Delta t$ é a duração da corrente, $\Delta B$ a largura de banda, $\frac{\Delta f_c}{f_c \Delta t}$ , que aqui trataremos como $\rho$ a deriva em frequência, $v_r$ é a velocidade radial, $B$ a intensidade do campo magnético e $R$ é o raio em unidades de raios solares ( $R_s$ ) a partir da fotosfera. . . . .	73
14	Ocorrência de tempestades tipo I para o ano de 2010. . . . .	92
15	Ocorrência de tempestades tipo I para o ano de 2011. . . . .	92
16	Ocorrência de tempestades tipo I para o ano de 2012. . . . .	94
17	Ocorrência de tempestades tipo I para o ano de 2013. . . . .	94
18	Ocorrência de tempestades tipo I para o ano de 2014. . . . .	96
19	Ocorrência de tempestades tipo I para o ano de 2015. . . . .	98

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AIA – *Atmospheric Imaging Assembly*

AR – Região Ativa

BLEN – *Bleien Observatory* - Zurique, Suíça

CALLISTO – *Compact Astronomical Low-cost Low-frequency Instrument for Spectroscopy and Transportable*

CELESTE – Centro Latinoamericano de ESTUDOS Solares TERrestres

CME – *Coronal Mass Ejection* (Ejeção de Massa Coronal)

FFT – Transformada de Fourier

FITS – *Flexible Image Transport System*

GMRT – *Giant Meterwave Radio Telescope*

GOES – *Geostationary Operational Environmental Satellite*

HMI – *Helioseismic and Magnetic Imager*

IDL – *Interactive Data Language*

INPE – Instituto Nacional e Pesquisas Espaciais

IRIS – *Interface Region Imaging Spectrograph*

LYRA – *Lyman Alpha Radiometer*

LOS – *line-of-sight*

NOAA – *National Oceanic and Atmospheric Administration*

NRH – *Nançay Radioheliograph*

PERL – *Practical Extraction and Report Language*

PROBA2 – *Project for On-Board Autonomy*

RNS – *Radio Noise Storm*

SDAC – *Solar Data Analysis Center*

SDO – (*Solar Dynamics Observatory*)

SDO/EVE – *Extreme Ultraviolet Variability Experiment*

sfu – solar flux unit (1 sfu =  $10^{-22}$  W/m<sup>2</sup>Hz)

SOHO – *Solar and Heliospheric Observatory*

SSM – *Standard Solar Model*

SSW – *Solar Soft Ware*

STEREO – *Solar Terrestrial Relations Observatory*

SWPC – *Space Weather Prediction Center*

U.A. – *Unidade Astronômica*

UT – *Universal Time*

## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>18</b>
1.1 O SOL	18
1.1.1 O Interior Solar	19
1.1.2 A Atmosfera Solar	19
1.1.2.1 Coroa	20
1.2 Motivação para Desenvolvimento da Tese	21
1.3 Objetivos	23
1.4 Estrutura da Tese	24
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>25</b>
2.1 O Campo Magnético Solar e o Dínamo	25
2.1.1 Regiões Ativas (ARs)	26
2.2 Rádio Emissão Solar	30
2.3 Emissão Tipo I	34
2.4 Correntes Tipo I	34
2.5 Tempestades de Ruído (RNS)	35
2.5.1 Mecanismo de Emissão de Tempestades Tipo I	37
2.6 A Teoria de Kolmogorov	39
2.6.1 Hipótese da isotropia local	39
2.6.2 Hipótese da Primeira Similaridade	40
2.6.3 Escalas de Kolmogorov	40
2.7 O Espectro de Energia ou Espectro de Potência	40
2.8 Espectro de Dissipação Magnética	41
<b>3 INSTRUMENTAÇÃO E DADOS</b>	<b>43</b>
3.1 Dados	43
3.2 Ferramentas Computacionais	43
3.3 A rede e-CALLISTO	43
3.3.1 Aquisição de Dados da rede e-CALLISTO	45
3.4 O CALLISTO-BLEN	46
3.5 GOES - <i>Geostationary Operational Environmental Satellite</i>	47
3.6 SDO - <i>Solar Dynamics Observatory</i>	47
3.6.1 Observações em Ultravioleta/ AIA - <i>Atmospheric Imaging Assembly</i>	47
3.6.2 HMI - <i>Heliioseismic and Magnetic Imager</i>	48
3.7 Python	49
3.8 SunPy	49
3.9 IDL - <i>Interactive Data Language</i>	50
3.10 SSW - <i>SolarSoftWare</i>	51

3.11	Software de Análise de Energia e Dissipação . . . . .	51
<b>4</b>	<b>EVOLUÇÃO DAS REGIÕES ATIVAS E A OCORRÊNCIA DE TEMPESTADES DE RUÍDO EM ONDAS MÉTRICAS . . . . .</b>	<b>53</b>
4.1	Introdução . . . . .	53
4.2	Metodologia . . . . .	54
4.3	Resultados . . . . .	54
4.4	Discussão . . . . .	63
4.5	Conclusões . . . . .	63
<b>5</b>	<b>PARÂMETROS OBSERVACIONAIS E FÍSICOS DE CORRENTES TIPO I EM DIAS COM E SEM <i>FLARE</i> . . . . .</b>	<b>65</b>
5.1	Introdução . . . . .	65
5.2	Metodologia . . . . .	65
5.2.1	Parâmetros Observacionais das Correntes Tipo I . . . . .	65
5.2.2	Parâmetros Físicos da Região Fonte das Correntes Tipo I . . . . .	67
5.3	Resultados e Discussão . . . . .	68
5.4	Conclusões . . . . .	72
<b>6</b>	<b>REORGANIZAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO FOTOSFÉRICO . . . . .</b>	<b>74</b>
6.1	Introdução . . . . .	74
6.2	Metodologia . . . . .	75
6.3	Resultados e Discussão . . . . .	79
6.4	Conclusão . . . . .	80
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO . . . . .</b>	<b>82</b>
7.1	Sugestões para Trabalhos Futuros . . . . .	84
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>86</b>
<b>A</b>	<b>Ocorrência de tempestades tipo I (RNS) para os anos de 2010 a 2015. . . . .</b>	<b>92</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O Sol tem sido, há muito, o foco da curiosidade da humanidade e ao longo da história ele inspirou novas religiões, filosofias e ciências, mudou a compreensão de nosso lugar no Universo e nos permitiu avançar nas fronteiras da astronomia estelar.

Agora, entende-se o Sol como uma estrela semelhante a qualquer outra em sua classe, passando por períodos de atividade que são extremamente ricos em complexidade física. O estudo de tais fenômenos complexos produziu avanços em muitas áreas da física, como a espectroscopia, a física de plasma, a magnetohidrodinâmica (MHD) e a física de partículas. Embora algumas dessas ciências tenham crescido ao longo de décadas (ou mesmo séculos) elas ainda estão incompletas.

Esta Tese espera contribuir para o contínuo crescimento dessas ciências e para ampliar a compreensão da estrela mais próxima.

Este capítulo começará com uma breve introdução aos conceitos físicos básicos que regem o comportamento do Sol, incluindo as camadas do interior solar e da atmosfera solar; será seguido por uma síntese histórica dos resultados das pesquisas sobre as tempestades de ruído, o principal escopo deste trabalho, e as emissões tipo I. No final serão destacadas questões em aberto no campo das pesquisas das tempestades de ruído e um esboço sobre como essas questões serão abordadas nesta Tese.

### 1.1 O SOL

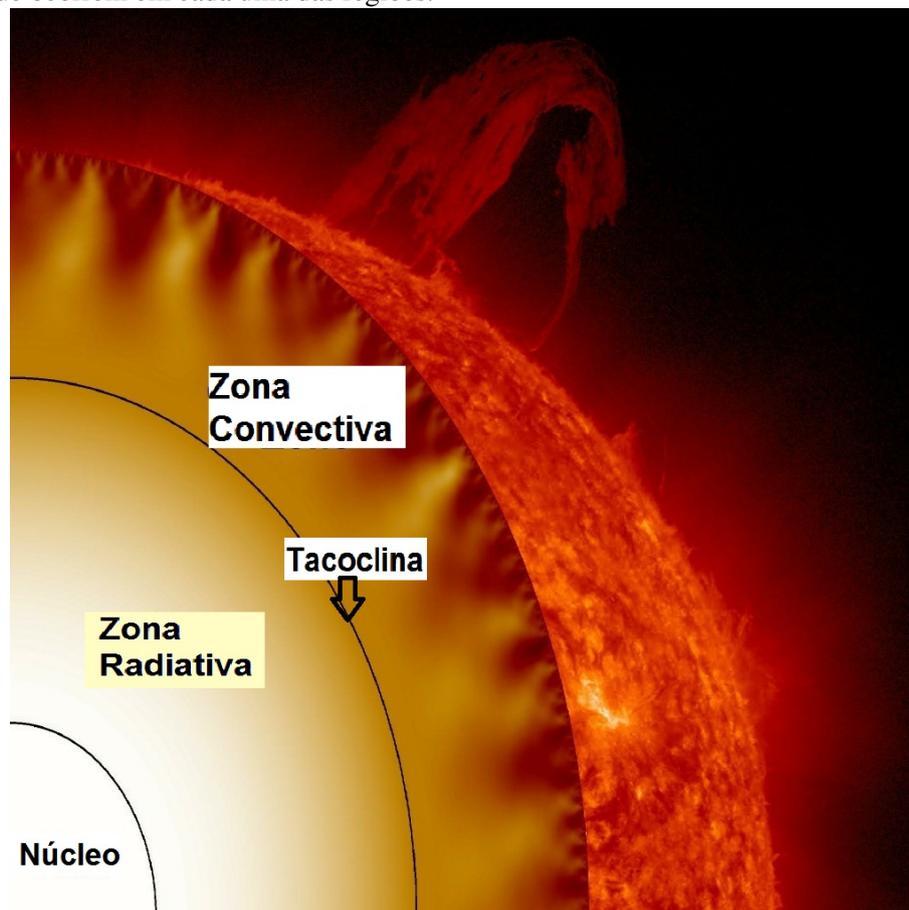
Ao observar o brilho do Sol e bilhões de outras estrelas a olho nú, o que se vê é radiação eletromagnética na faixa do visível. A luz visível observada no Sol provém da fotosfera (camada relativamente estreita, chamada de superfície, apesar de não ser sólida). Na camada mais exterior do Sol, a coroa solar, a emissão óptica é muito tênue, e pode ser observada somente quando sua superfície é ocultada, como durante um eclipse. Na antiguidade, as primeiras observações da coroa solar durante eclipses foram relatadas por povos indianos, babilônicos e chineses (ASCHWANDEN, 2005).

O Sol é a estrela mais próxima, localizada  $1,49 \times 10^6$  km da Terra no centro do sistema solar. Situado na sequência principal do diagrama Hertzsprung-Russel (HR), tem classe espectral G2V, luminosidade de  $L_s = (3,84 \pm 0,04) \times 10^{26}$  W, massa de  $M_s = (1,9889 \pm 0,0003) \times 10^{30}$  kg e raio de  $R_s = (6,959 \pm 0,007) \times 10^8$  m (Foukal, 2004). Ele entrou na sequência principal há cerca de  $4,6 \times 10^9$  anos atrás, quando uma nuvem molecular gigante sofreu colapso gravitacional e começou a fusão nuclear de hidrogênio em seu núcleo (BOUVIER; WADHWA, 2010; MONTMERLE et al., 2006). A energia produzida a partir desta fusão resultou em pressão suficiente para contrabalançar a contração gravitacional e trazer um equilíbrio hidrostático, permitindo à jovem estrela alcançar uma estabilidade que é sustentada até hoje. A energia lançada durante este processo é a fonte de luz e de toda a atividade energética que observamos a partir da Terra e além.

### 1.1.1 O Interior Solar

O interior solar é separado em quatro regiões, de acordo com os diferentes processos que ocorrem em cada uma das regiões. A energia é gerada no núcleo. Esta energia difunde-se para fora através de radiação (principalmente raios gama e raios-X) através da zona radiativa e por fluxos de fluido convectivo (movimento de ebulição) através da zona de convecção. A camada de interface fina (a "tacoclina") entre a zona radiativa e a zona de convecção é onde, acredita-se, que o campo magnético do Sol seja gerado (HATHAWAY, 2013).

Figura 1 - Regiões do interior solar. A classificação da região é feita de acordo com os diferentes processos que ocorrem em cada uma das regiões.



Fonte: Adaptado de <<https://solarscience.msfc.nasa.gov/interior.shtml>>.

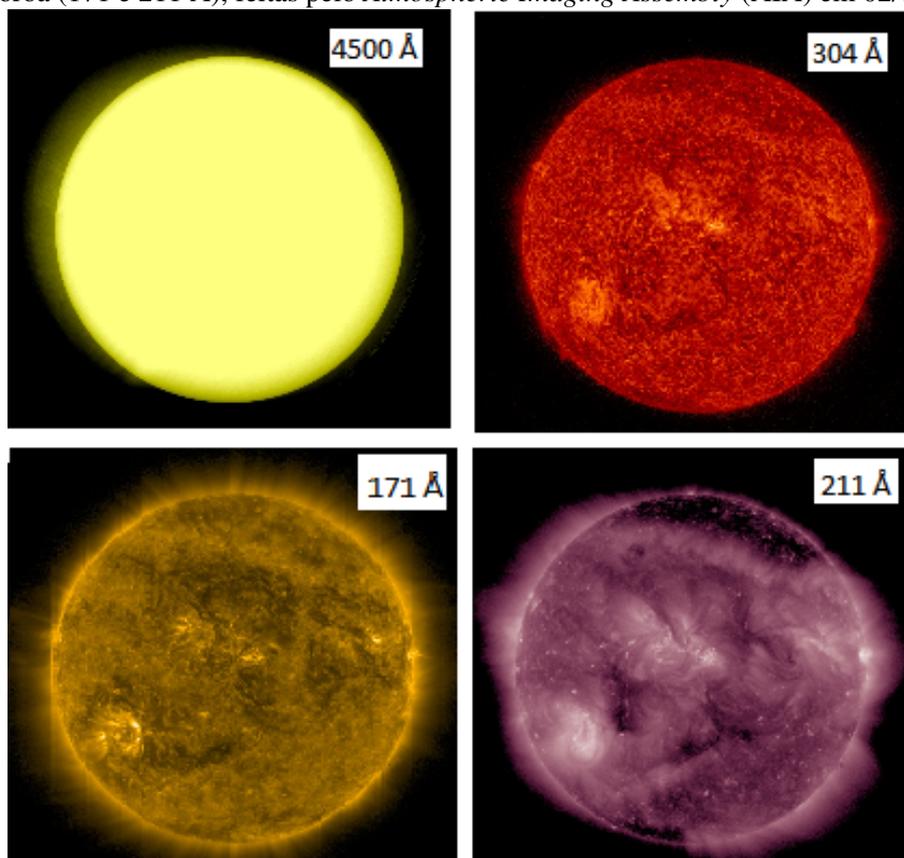
### 1.1.2 A Atmosfera Solar

A atmosfera solar começa acima da superfície visível do sol, conhecida como fotosfera. Neste ponto, o Sol se torna opticamente fino à radiação visível e a luz escapa desta superfície. Para além desta superfície visível estão a cromosfera solar e a coroa solar.

A imagem do SDO (*Solar Dynamics Observatory*)/AIA (*Atmospheric Imaging Assembly*) em 304 Å mostra a cromosfera e a região de transição, em que a rede supergranular ainda pode ser vista (Figura 2), essa luz é emitida pelo He II ao redor de  $5 \times 10^4$  K. A imagem

em 171 Å mostra a região de transição superior e coroa calma, é emitida pelo Fe IX ao redor de  $6 \times 10^5$  K. A rede praticamente desapareceu nesta altura. Como descrito, a rede apresenta a estrutura magnética da atmosfera, por conseguinte, o campo magnético vai de ordenado e concentrado na cromosfera para mais complexo na coroa. A imagem de 211 Å emitida pelo Fe XIV à temperatura de  $2 \times 10^6$  K, mostra a coroa e as regiões magneticamente ativas na coroa. Em 4500 Å se vê a fotosfera no visível com temperaturas na faixa de 4000 a 6000 K.

Figura 2 - Observações da Fotosfera (4500 Å), Cromosfera (304 Å), Região de Transição (304 e 171 Å) e Coroa (171 e 211 Å), feitas pelo *Atmospheric Imaging Assembly* (AIA) em 02/11/2016.



Fonte: NASA/SDO/Goddard

### 1.1.2.1 Coroa

A coroa só pode ser observada a olho nú durante eclipses, pois apesar de ter um brilho equivalente ao da lua cheia, ela fica obscurecida quando a fotosfera é visível. O espectro da coroa mostra linhas muito brilhantes, que são produzidas por átomos de ferro, níquel, neônio e cálcio altamente ionizados. O fato de existirem esses elementos várias vezes ionizados na coroa implica que sua temperatura deve ser muito alta, pois é necessária muita energia para arrancar muitos elétrons de um átomo. A coroa deve ter uma temperatura em torno de  $10^6$  graus Kelvin. A elevação da temperatura na coroa deve ter origem no mesmo processo físico que aquece a cromosfera: transporte de energia por correntes elétricas induzidas por campos magnéticos variáveis (OLIVEIRA; SARAIVA, 2004).

A presença de espécies altamente ionizadas de elementos pesados significa que a baixa coroa pode ser observada principalmente no ultravioleta (UV) e raios-X. Quando vista nestes comprimentos de onda, a coroa parece altamente estruturada, apresentando concentrações de *loops* brilhantes conhecidos como regiões ativas (Figura 2). Comprimentos de onda UV permitem observações da baixa coroa, a apenas algumas escalas de alturas. No entanto, as mais extensas observações da coroa são no visível, principalmente devido à dispersão de luz fotosférica por partículas e grãos de poeira.

As características de altura, temperatura, densidade, campo magnético e o domínio da pressão magnética sobre a pressão do gás ( $\beta$  de plasma) para o Sol calmo são dadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Características de altura, temperatura (T), densidade ( $\eta$ ), campo magnético (B) e a razão entre a pressão magnética ( $P_M$ ) e a pressão do gás ( $P_G$ ) ( $\beta$  de plasma =  $\frac{P_G}{P_M}$ ) para o Sol calmo. Na Tabela UA é unidade astronômica, ou seja, aproximadamente a distância média entre a Terra e o Sol.

Camada	Altura	T[K]	$\zeta[\text{cm}^{-3}]$	B [G]	$\beta$ de plasma
Fotosfera	0 - 0,25 Mm	$5 \times 10^5$	$2 \times 10^{17}$	500	14
Cromosfera	0,25 - 2,5 Mm	$1 \times 10^4$	$1 \times 10^9$	300	0,0001 - 1
Região de Transição	2 - 3 Mm	$1 \times 10^4 - 1 \times 10^6$	$1 \times 10^9 - 1 \times 10^{11}$	300	0,0001
Coroa	1,0 - 2,5 $R_s$	$1 - 3 \times 10^6$	$1 \times 10^9$	10	0,07 - 0,2
Coroa Exterior	1 $R_s$ - 100 UA	$1 \times 10^6$	$1 \times 10^7$	0,1	7
Atmosfera da Terra	Nível do mar	$1 \times 10^2$	$2 \times 10^{19}$	0,5	$\gg 1$

Fonte: Adaptado de Aschwanden (2005), Gary (2001)

Observações na faixa do visível, UV e raios-X continuam a ser o principal método de imageamento da coroa. No entanto, a coroa é também um forte emissor em toda a faixa do comprimento de onda de rádio, a partir de microondas até comprimentos de onda quilométricos.

## 1.2 Motivação para Desenvolvimento da Tese

A investigação dos fenômenos solares tem avançado significativamente nas últimas décadas (ASCHWANDEN, 2005), porém a dinâmica da coroa solar e detalhes dos processos de liberação de energia, aceleração e transporte de partículas, associados a fenômenos eruptivos solares, como os *flares* solares e as ejeções de massa coronal (*CME*), ainda não são plenamente compreendidos (SHANMUGARAJU et al., 2003; BENZ et al., 2009). A tais fenômenos, geralmente estão associadas emissões em radiofrequências, especialmente nas faixas métrica e decimétrica (KAHLER, 1992; SAWANT et al., 2002; FERNANDES et al., 2004; FERNANDES et al., 2008) como emissões tipo I (WARMUTH; MANN, 2004; SODRÉ et al., 2011; SODRÉ et al., 2012; SODRÉ, 2013).

Essencialmente duas faixas de comprimentos de onda são observados em solo e fornecem informações da coroa solar: comprimentos de onda no óptico e em rádio, isso devido

à atmosfera terrestre, que barra a propagação de radiação em determinados comprimentos de onda. Observações solares na faixa de radiofrequências, desde ondas métricas e decimétricas até milimétricas, têm fornecido resultados que contribuem para um melhor entendimento dos fenômenos eruptivos solares que têm origem nas diferentes camadas da atmosfera solar. Os dados de emissões solares nestas faixas de onda de rádio são importantes para a investigação de diversos problemas ainda em discussão na física solar; questões essas que estão principalmente relacionadas a processos de armazenamento e liberação de energia, à aceleração e ao transporte de partículas energéticas e à caracterização e localização das regiões de aceleração destas partículas (BENZ, 1996).

Diversos fenômenos podem ser registrados em ondas de rádio, que são emissões produzidas por diferentes mecanismos físicos, e estão relacionados às propriedades da coroa solar (como densidade e temperatura) e também ao campo magnético coronal.

Tempestades de ruído, chamadas emissões tipo I (descritas em detalhes no Capítulo 2) foram o primeiro evento em rádio descoberto em ondas métricas, e são o fenômeno mais comum neste comprimento de onda. Eventos tipo I duram de poucas horas a vários dias (KRUCKER et al., 1995). Contudo, ainda hoje não há uma explicação definitiva para as propriedades observadas destes eventos (TABOADA et al., 2010).

Ainda que tempestades de ruído (*Radio Noise Storms* - RNS - na sigla em inglês) tenham sido descobertas durante a década de 40, no século anterior, e sejam o fenômeno mais comum em comprimentos de onda métricos, o conhecimento sobre os processos físicos responsáveis pelas mesmas ainda é escasso.

As tempestades tipo I (RNS) são as menos estudadas, no entanto, com o advento de novos equipamentos e tecnologias de observação, novos dados e descobertas relacionados ao estudo da tempestades de ruído têm sido apresentados por vários pesquisadores (MELROSE, 1980; KAI et al., 1985; ODSTRCIL; KARLICKY, 1998; ZANNA et al., 2011; IWAI et al., 2012).

Odstrcil e Karlicky (1998) usaram as ideias de ondas de choque fracas e reconexão local, propondo que correntes tipo I (definidas em 2.4), associadas às tempestades de ruído, são geradas durante interações de ondas de choque super-Alfvênicas fracas com lâminas de corrente que são distribuídas na região ativa. Usando modelos de MHD (magnetohidrodinâmica) em simulações numéricas, sugerem que estes fenômenos são a assinatura de rádio de reconexões localizadas, causadas por choques fracos nas lâminas de corrente; essas reconexões induzem campos elétricos acelerando elétrons através de mecanismo de emissão de plasma, gerando correntes em tempestades de ruído.

Reconexões localizadas podem ser consideradas como nanoflares que aquecem o ambiente de plasma coronal e aceleram partículas. Para Parker (1988) um nanoflare é a unidade básica de liberação de energia impulsiva, e o que nós vemos como coroa em raio-X é simplesmente a superposição de um grande número de nanoflares.

Para Mercier e Trottet (1997) eventos de liberação de pequenas quantidades de energia

podem contribuir para o aquecimento de uma região ativa coronal.

Iwai et al. (2012) analisaram estudos prévios de RNS e reportaram que a atividade está relacionada com a evolução das estruturas magnéticas coronais e sua ejeção. Isto é porque as propriedades dos *bursts* solares dependem de muitos processos como a aceleração de partículas, geração de ondas e diretividade da emissão, dado que o fluxo dos mesmos pode ser modulado por qualquer um desses, e é importante identificar o processo de plasma que causa a variação temporal da RNS.

Existe hoje uma grande quantidade de dados sobre a atividade solar em ondas métricas disponíveis e facilmente acessáveis, por exemplo, os dados da rede e-CALLISTO (BENZ et al., 2009).

A análise de uma tempestade de ruído registrada em 14/06/2012, mostrou que as emissões tipo I mais intensas ocorreram próximo e durante a ocorrência de *flares* classe M (SODRÉ; FERNANDES, 2014a). Já na análise de um período de ocorrência de tempestades (entre 5 e 16 de maio de 2012) em Sodré e Fernandes (2014b), verificou-se que as tempestades mais duradouras foram registradas na presença de regiões ativas mais complexas e com maior área. Contudo, na presença de regiões ativas menos complexas também houve registro de tempestades, ainda que menos intensas (duradouras).

Segundo Benz (2008) a liberação de energia na coroa através dos *flares* aquece o plasma e acelera elétrons, podendo também causar ondas turbulentas (ou ondas de alta-frequência). No processo dos *flares* pouco pode ser observado antes da energia aparecer como partículas aceleradas (BENZ, 2008). Desses estudos, sobressai a ideia de que as RNS estão associadas às regiões ativas (ARs), mas não diretamente aos *flares* solares, como também relatado por Zanna et al. (2011).

Outra questão a ser considerada é a aceleração de elétrons (e aceleração de partículas em geral), que é de importância central em vários problemas astrofísicos. Uma compreensão completa deste processo na coroa solar pode, portanto, ajudar na compreensão de objetos que estão mais distantes e menos acessíveis às observações (SUBRAMANIAN, 2007).

### 1.3 Objetivos

A busca por um melhor entendimento dos fenômenos solares demanda a combinação de observações numa ampla faixa do espectro eletromagnético (BENZ et al., 2009). Para eventos solares de longa duração, como tempestades de ruído, que podem durar horas, as observações espectroscópicas simultâneas e contínuas são essenciais, porém difíceis (FERNANDES et al., 2000; BENZ et al., 2009), para uma investigação satisfatória da ocorrência e evolução desses fenômenos (KIM et al., 2005; HARRA, 2007). Portanto, é necessário aprimorar e combinar os diferentes diagnósticos observacionais desses fenômenos, a fim de viabilizar progressos no seu diagnóstico e sua interpretação física.

Assim, o objetivo dessa Tese é investigar a seguinte questão:

Quais os agentes responsáveis por manter a aceleração dos elétrons durante as RNS?

Para isso, algumas etapas serão:

- ampliação da estatística de ocorrência de emissões tipo I detectadas pelos espectrômetros da rede e-Callisto;
- determinação dos parâmetros espectro-temporais de emissões tipo I, na faixa métrica;
- determinação de parâmetros da fonte das tempestades de ruído (densidade eletrônica, velocidade radial dos agentes emissores, campo magnético e altura da fonte);
- análise e interpretação da ocorrência de radioemissões solares tipo I (tempestades de ruído) em ondas métricas;
- levantamento da atividade solar associada às tempestades (*flares*);
- investigação da associação das radioemissões analisadas com a ocorrência de *flares* solares em raio-X;
- investigação da morfologia das AR associadas à origem das emissões tipo I;
- análise da evolução magnética das AR e
- análise da reorganização do campo magnético fotosférico.

A fim de se chegar a uma resposta às questões acima levantadas, a proposta é que se siga a estrutura descrita abaixo.

#### **1.4 Estrutura da Tese**

No Capítulo 2, são revisados os principais aspectos da fenomenologia e da física das emissões solares observadas em ondas de rádio, com ênfase nas ondas em comprimento métrico e as teorias que envolvem os estudos sobre a reorganização do campo magnético fotosférico (teoria de Kolmogorov, espectro de energia e espectro de dissipação).

No Capítulo 3, há uma descrição da rede e-CALLISTO com as principais características dos instrumentos que fazem parte da mesma. Neste mesmo capítulo, são apresentados detalhes do espectrógrafo CALLISTO-BLEN, cujos dados, disponibilizados na internet, foram utilizados neste trabalho. Há ainda neste capítulo uma descrição dos outros instrumentos (AIA, HMI) e softwares utilizados (python e sunpy) na redução e análise dos dados.

Os Capítulos 4, 5 e 6 descrevem a metodologia seguida em cada etapa das investigações desta Tese, os resultados obtidos e uma conclusão.

O Capítulo 7, é reservado às conclusões e considerações finais a respeito do trabalho realizado, dos resultados obtidos e objetivos alcançados. Também neste capítulo, são apresentadas sugestões para trabalhos futuros que venham complementar ou aprimorar esta Tese.

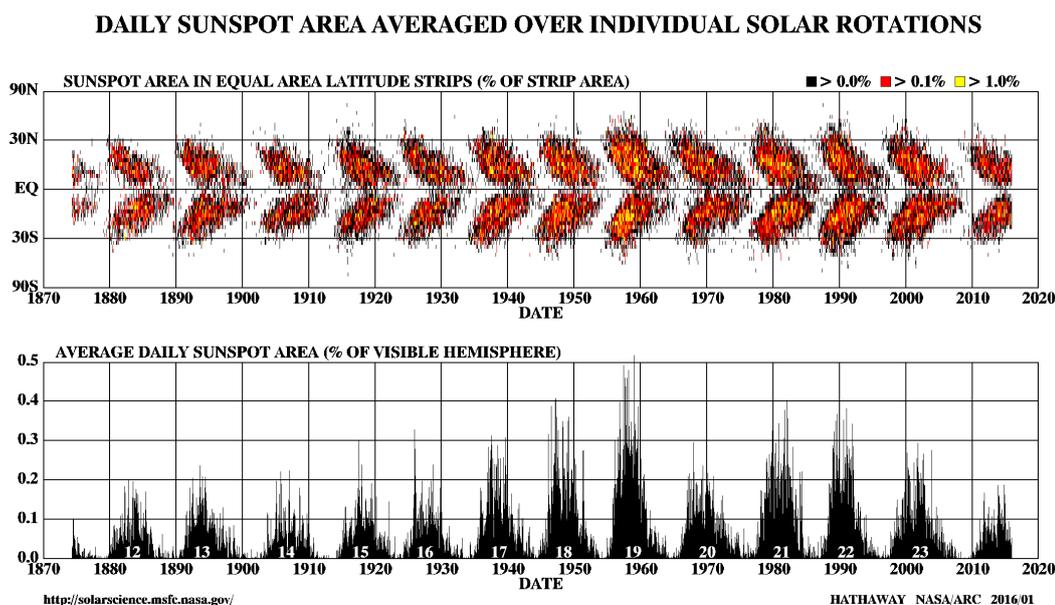
## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 O Campo Magnético Solar e o Dínamo

A maioria das características da emissão solar está diretamente relacionada à atividade solar, e o aspecto mais marcante desta atividade é o ciclo de aproximadamente 11 anos, período no qual o número de manchas solares varia, oscilando entre períodos de mínimo e máximo (por exemplo, Cecatto (2003)).

O campo magnético solar desempenha um papel dominante na atividade energética que ocorre na atmosfera solar. No mínimo da atividade solar, o campo magnético tem uma estrutura dipolar poloidal. No entanto, conforme o ciclo de atividade progride para o máximo, o campo ganha um componente toroidal forte, tornando-se muito mais dinâmico e complexo. Este componente toroidal complexo manifesta-se na superfície como manchas solares. Assim, o número de manchas solares no disco tem sido usado como predição para o ciclo de atividade magnética há mais de 100 anos, mostrando uma periodicidade aproximada de 11 anos (Figura 3, painel inferior). No início do ciclo, as manchas tendem a aparecer no disco com uma distribuição latitudinal de  $\pm 30^\circ$  do equador. À medida que o ciclo progride, as manchas solares aparecem nas latitudes mais baixas e em menor número (conhecida como a "Lei de Spöre"), até que acabam por praticamente desaparecer no final de um ciclo. A latitude das manchas solares ao longo do tempo é apresentada na Figura 3 (painel superior) e é conhecida como "diagrama borboleta".

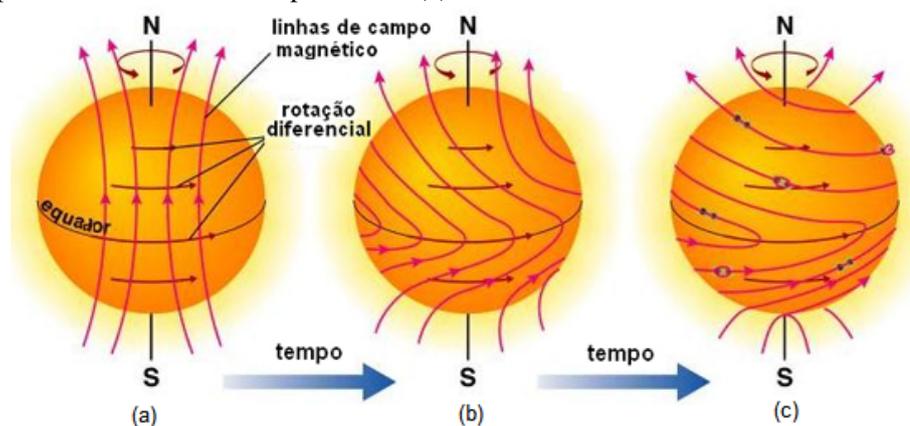
Figura 3 - Distribuição das manchas solares. Painel superior: latitude das manchas solares ao longo do tempo. Painel inferior: número de manchas ao longo dos ciclos, evidenciando a periodicidade aproximada de 11 anos.



Fonte: <<http://solarscience.msfc.nasa.gov/images/>>

Ao longo de um ciclo solar, o Sol muda de polaridade no momento do máximo de manchas solares. Por exemplo, uma configuração bipolar de Norte-Sul vai se tornar Sul-Norte, um outro ciclo vai trazê-lo de volta para o Norte-Sul uma vez mais (um ciclo magnético completo leva 22 anos). O comportamento complexo do campo magnético solar ao longo de um ciclo de atividade de 11 anos, durante o qual o sinal do dipolo se reverte, é geralmente explicado pela teoria do dínamo solar. A teoria emprega modelos magnetohidrodinâmicos (MHD) que envolvem fluxos em grande escala no interior solar que agem para induzir e difundir o campo magnético de tal forma que produz o familiar ciclo de atividade magnética de 11 anos (CHARBONNEAU, 2010). Embora a teoria do dínamo solar seja uma área ativa de pesquisa e uma série de questões ainda permaneçam abertas, o paradigma geralmente aceito para o ciclo de atividade foi primeiro proposto por Babcock (1961). O mecanismo envolve rotação diferencial da zona de convecção solar (Figura 4), que tende a arrastar o campo a partir de uma posição poloidal (indo de um pólo a outro) em uma toroidal (paralelo ao equador, conhecido como efeito  $\Omega$ ), eventualmente, enrolando o campo em torno do eixo solar em um estado estressado.

Figura 4 - Representação esquemática do modelo de dínamo. Partindo de um campo poloidal limitado às regiões polares (a), os segmentos de linha de campo situados no equador são arrastados mais depressa do que os outros, resultando num alongamento equatorial e no aparecimento de um campo toroidal (b). Originam-se, assim, campos muito concentrados, intensos e de aspectos opostos de um hemisfério para outro (c).



Fonte: Adaptado de <[http://irischallenge.arc.nasa.gov/iris\\_weeklyquestions.html](http://irischallenge.arc.nasa.gov/iris_weeklyquestions.html)>

### 2.1.1 Regiões Ativas (ARs)

A principal fonte geradora do campo está na região abaixo da zona de convecção, conhecida como taoclina. O campo armazenado é eventualmente enrolado em estruturas magnéticas torcidas chamadas "*flux-ropes*". Uma acumulação contínua de força de campo magnético nessas cordas aumenta a sua pressão magnética e elas se tornam convectivamente instáveis e sobem à superfície. Quando o campo magnético eventualmente vem à superfície, ele cria manchas solares na fotosfera e uma estrutura complexa na atmosfera solar conhecida como região ativa

(FAN, 2009). As regiões ativas podem elas próprias ser torcidas e geralmente evoluem para armazenar enormes quantidades de energia magnética. A conversão da energia magnética em energia térmica e cinética é o que causa eventos eruptivos e explosivos como os *flares* e *CMEs*.

### **Grupos de Manchas Solares**

Um grupo de manchas solares é considerado um elemento do campo magnético toroidal em grande escala dentro da zona de convecção solar.

Os campos magnéticos no Sol são esticados e enrolados pela rotação diferencial (mudança na velocidade de rotação em função da latitude) (HATHAWAY, 2010).

A torção das linhas do campo magnético é causada pelos efeitos de rotação do Sol. Este é o chamado Efeito Alfa ( $\alpha$ ) (HATHAWAY, 2010). Há dois mecanismos que podem produzir este efeito. Na base da zona de convecção, a torção em uma corda de fluxo orientada longitudinalmente pode resultar numa instabilidade da torção, o que poderia produzir um laço em forma de  $\alpha$ . Além disso, a força de Coriolis pode causar um fluxo crescente na corda e colocá-la para rodar. O sentido de rotação será oposto nos hemisférios norte e sul.

Os primeiros modelos de dínamo do Sol assumiram que a torção é produzida pelos efeitos de rotação do Sol em grandes fluxos convectivos que transportam calor na superfície do Sol (HATHAWAY, 2010). Os modelos mais recentes de dínamo assumem que a torção é devido ao aumento da rotação do Sol sobre os tubos de campo magnético (HATHAWAY, 2013). A torção produzida pelo efeito  $\alpha$  faz com que os grupos de manchas solares obedeçam a "Lei de Joy"<sup>1</sup> e também faz a inversão do campo magnético de um ciclo de manchas solares para o próximo ("Lei de Hale") (HATHAWAY, 2010).

Na interface fotosférica, a estrutura aparece como um dipolo magnético com uma parte da corda fluxo que sai da superfície e a outra parte que entra novamente. A estrutura magnética acima da fotosfera a  $\approx 100$  Mm para a atmosfera é chamada de região ativa.

Existe atualmente um sistema de "classificação" para um grupo de manchas solares que é usado como um "*proxy*" para a complexidade. Três exemplos dessa classificação podem ser vistos na Figura 5. A classe mais simples é "alfa": uma polaridade de campo magnético. Um pouco mais complexa é um grupo de manchas classificadas como "beta": duas polaridades, ou bipolar. Uma classificação "gama" é mais complexa e indica que as polaridades são misturadas entre si (isto é, essencialmente que uma única linha, bastante reta, não pode dividir as regiões de branco e preto). Existem outras variações dessas classificações básicas, que fazem parte do esquema de classificação "Hale" ou "Mt. Wilson". O esquema de Hale baseia-se tanto em magnetogramas como em imagens de luz visível de grupos de manchas solares.

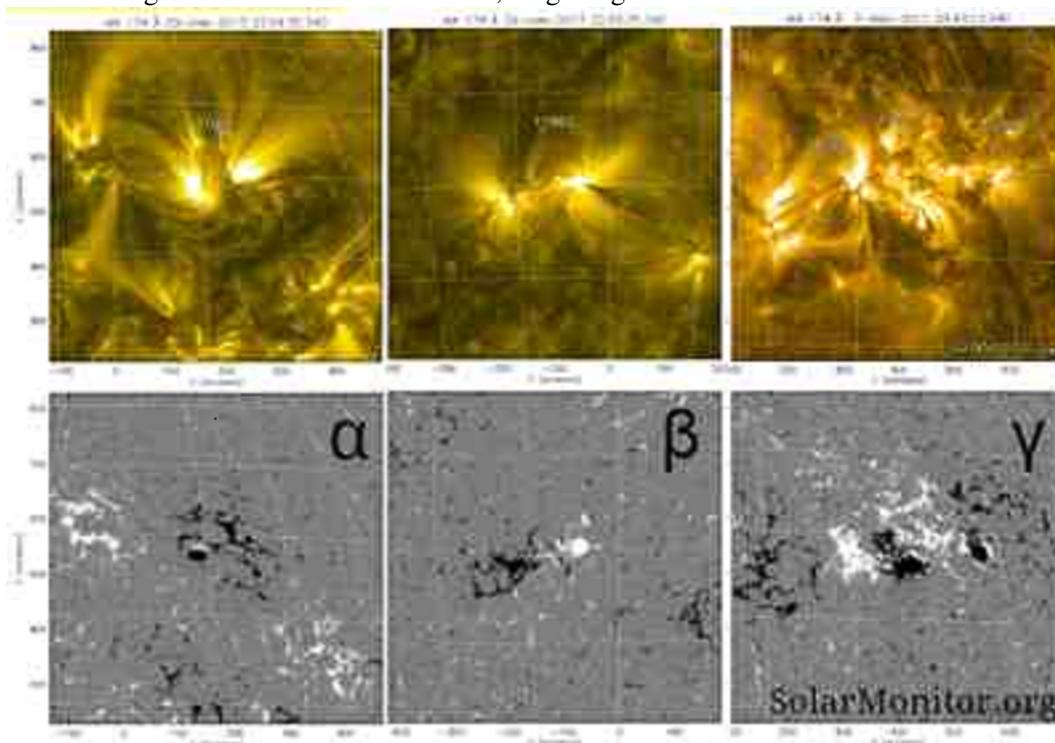
Regiões ativas têm complexidade variada, e sua classificação em complexidade é vista na Tabela 2.

**Flares Solares** O *flares* solares são fenômenos que caracterizam-se pela emissão de

<sup>1</sup> indica que há uma inclinação sistemática, da ordem de  $\approx 4$  graus, no alinhamento dos pares de manchas solares em relação ao equador.

t

Figura 5 - Exemplos da complexidade magnética das manchas solares. Nos painéis superiores são mostradas imagens em EUV e nos inferiores, magnetogramas.



Fonte: <<https://blog.sunspotter.org/page/2/>>(Autor:Dr.PaulA.Higgins)>

Tabela 2 - Classificação das regiões ativas conforme a complexidade das manchas solares.

<b>Categoria</b>	<b>Características</b>
$\alpha$	grupo unipolar de manchas solares
$\beta$	grupo de manchas que possuem ambas as polaridades magnéticas positiva e negativa, com uma divisão simples e distinta entre as polaridades
$\beta\gamma$	grupo de manchas que é bipolar, mas em que não se podem distinguir as manchas de polaridades opostas
$\delta$	configuração magnética complexa de um grupo de manchas solares consistindo de umbra com polaridades opostas dentro da mesma penumbra
$\gamma$	região ativa complexa na qual as polaridades positiva e negativa são distribuídas irregularmente

Fonte: <<http://www.spaceweather.com/glossary/magneticclasses.html>>

grandes quantidades de energia ( $10^{19}$  -  $10^{25}$  J), em intervalos de tempo relativamente curtos, variando de alguns segundos até poucas horas, para os fenômenos mais intensos.

A energia cinética/térmica liberada é proveniente da energia magnética armazenada na atmosfera solar, no interior das regiões ativas. Toda essa energia, que não chega a 10% de toda a energia emitida pelo Sol durante 1 s, provoca o aquecimento e aceleração dos elétrons, prótons e íons mais pesados presentes nos locais de liberação de energia e em sua vizinhança próxima. A interação das partículas energizadas com o meio ambiente provoca emissão de energia, na forma de radiação, que se distribui por grande parte do espectro eletromagnético, estendendo-se desde ondas de rádio quilométricas a raios-X e raios-gama, podendo produzir também a emissão de partículas (íons e elétrons) energéticos.

Algumas outras definições de *flare* são:

- fenômeno observado como um brilho de qualquer emissão ao longo do espectro eletromagnético numa escala de tempo de minutos (BENZ, 2008) e
- aquecimento rápido e temporário de uma parte restrita da coroa e cromosfera solar (SVESTKA, 1976).

Das muitas mudanças, instabilidades e erupções vistas no Sol, o que os *flares* têm em comum é o aquecimento de material a temperaturas de  $10^7$  K ou superiores a esta (GOLUB; PASACHOFF, 2009).

A ocorrência de um *flare* é dividida em fases a saber (GOLUB; PASACHOFF, 2009):

- precursora: uma pequena quantidade de liberação de energia ocorre como anúncio do evento principal;
- fase impulsiva: liberação súbita de energia de uma maneira explosiva e
- fase principal: liberação de energia da fase pós-impulsiva de duração maior e suas consequências.

Existem dois esquemas de classificação das explosões: classificação de importância  $H\alpha$  (Tabela 3) e classificação baseada na intensidade da emissão em raios-X mole (Tabela 4).

Tabela 3 - Classificação de importância  $H\alpha$  para os *flares* solares. Na Tabela, Área<sup>1</sup> é dado em milionésimos do hemisfério solar e Área<sup>2</sup> em graus quadrados heliocêntricos =  $1,48 \times 10^{18}$  cm<sup>2</sup>.

Área <sup>1</sup>	Área <sup>2</sup>	Importância (Classe)
<100	<2,06	S (subflare)
100 - 250	2,06 - 5,15	1
250 - 600	5,15 - 12,4	2
600 - 1200	12,4 - 24,7	3
>1200	>24,7	4

Fonte: Adaptado de Golub e Pasachoff (2009)

A classificação em raios-X é baseada na produção total integrada de raios-X mole

detectado no Sol em  $1 - 8 \text{ \AA}$ , monitorado por satélites como o GOES.

Tabela 4 - Classificação raio-X para os *flares* solares.

Classe	Fluxo [ $\text{Wm}^{-2}$ ]	Intensidade [ $\text{erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ]
X	$10^{-4}$	$10^{-1}$
M	$10^{-5}$	$10^{-2}$
C	$10^{-6}$	$10^{-3}$
B	$10^{-7}$	$10^{-4}$
A	$10^{-8}$	$10^{-5}$

Fonte: Adaptado de Golub e Pasachoff (2009)

## 2.2 Rádio Emissão Solar

Como relata Aschwanden (2005), observações regulares de eclipses solares começaram em 1842, sendo observados por experientes astrônomos da época, tais como: Airy, Arago, Bailey, Littou e Struve. Registros fotográficos começaram com o eclipse de 1851, na Noruega e na Suécia, com o fotógrafo profissional Berkowski. Durante o século 19, observações visuais e espectroscópicas de proeminências foram realizadas por Pietro Angelo Secchi na Itália e por Charles Augustus Young na Universidade de Princeton. George Ellery Hale construiu um espectroheliógrafo, em 1892, e observou linhas espectrais durante eclipses. Em 1930, Bernard Lyot construiu seu primeiro coronógrafo, um instrumento que ocultava o brilho do disco solar permitindo assim observações coronais rotineiras, sem a necessidade de se esperar por um raro evento de eclipse solar total.

O Sol emite radiação em grande faixa do espectro além da luz visível, por exemplo em ondas de rádio. As investigações nestas faixas do espectro contribuem para o melhor entendimento da estrutura, composição e dos fenômenos associados à atividade solar.

### Mecanismos de Emissão em Ondas de Rádio

Em rádio, há uma variedade de mecanismos de emissão que irradiam em frequências características, tais como:

- Emissão Giromagnética (ROSAL, 2003): a radiação emitida por partículas carregadas quando estão espiralando num campo magnético; é classificada de acordo com a velocidade das partículas em:
  - 1) ciclotrônica: para partículas não relativísticas ( $0 \text{ a } \approx 0,03 c$ );
  - 2) girossincrotrônica: para partículas semi-relativísticas ( $\approx 0,03c - \approx 0,94c$ );
  - 3) sincrotrônica: para partículas ultra-relativísticas ( $\approx 1c$ ).
- *Bremsstrahlung*: também conhecido como emissão livre-livre (*free-free emission*), vem do alemão e significa *radiação de freamento*; essa emissão ocorre devido à desaceleração causada pelo campo de uma carga sobre outra (RYBICKI; LIGTHMAN, 1979) e

- Emissão de Plasma: processo de emissão em que a energia das ondas de Langmuir (detalhadas a seguir) é convertida em radiação (KAI et al., 1985; MCLEAN; LABRUM, 1985a).

O plasma possui uma frequência característica denominada *frequência de plasma*, que são oscilações de elétrons livres em torno de suas respectivas posições de equilíbrio. O plasma oscila em inúmeras outras frequências, sendo que cada uma é o resultado da presença ou não de campos magnéticos externos, da geometria destes mesmos campos, da temperatura dos íons e também da propagação de ondas eletromagnéticas que viajam pelo plasma, entre elas as ondas de *Alfvén*<sup>2</sup>) (KAI et al., 1985).

Nas ondas de Langmuir, os elétrons do plasma são deslocados de sua posição de equilíbrio em relação aos íons, que, devido à inércia, permanecem praticamente estacionários. Isso gera uma diferença de potencial, que por sua vez, gera campos elétricos restauradores, que tendem a trazer novamente os elétrons para a posição de equilíbrio inicial. No entanto, devido à força restauradora, os elétrons sofrem um movimento oscilatório em torno da posição de equilíbrio. Esta oscilação recebe o nome de *onda de Langmuir* e sua frequência de oscilação é igual à frequência de plasma, sendo dependente apenas da densidade do plasma local (CHEN, 1983).

Uma emissão isolada, chamada comumente de *burst* é o fenômeno de menor duração observado em uma emissão solar em ondas de rádio. É também o fenômeno básico em uma tempestade de ruído (ELGARROY, 1961). Assim, como utilizado por Elgaroy (1961), os termos emissão tipo I, *burst* tipo I ou simplesmente *burst* será utilizado no presente trabalho, significando um fenômeno individual de curta duração, banda estreita, e que tem essencialmente um aumento e uma diminuição na sua intensidade.

Um espectro dinâmico (Figura 6) é o registro de uma rádio emissão em tempo  $\times$  frequência  $\times$  intensidade. Um distúrbio viaja em direção ao exterior do Sol e cada altura gera radiação na frequência de plasma local, então o movimento vertical será detectado em um *espectro dinâmico de rádio* apresentando taxa de deriva a uma razão que depende da velocidade de propagação do distúrbio (DULK, 1985). Historicamente, o eixo das frequências, representado na vertical, é invertido, ou seja, apresenta crescimento para baixo.

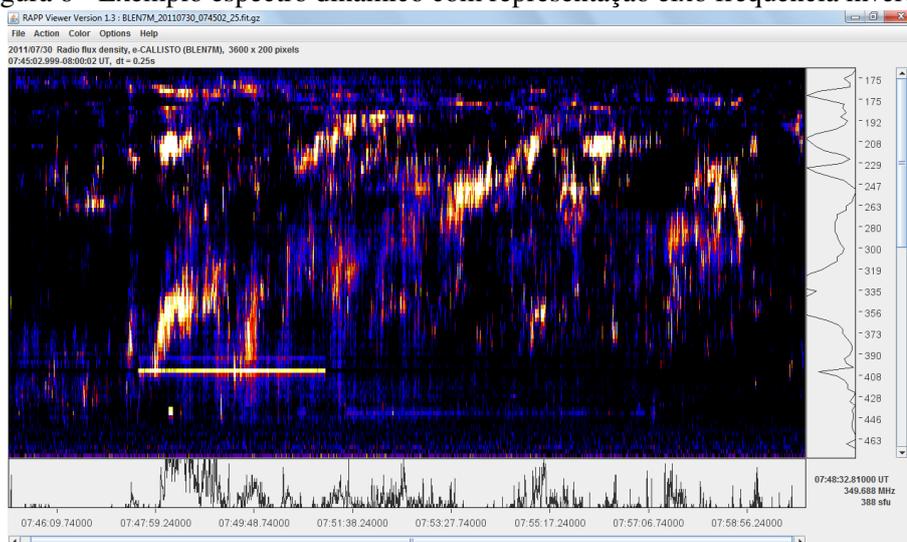
Isto se deve ao fato de que a frequência da emissão registrada é diretamente proporcional à densidade eletrônica do plasma da atmosfera solar, que, por sua vez, é inversamente proporcional à altura (distância a partir da fotosfera solar). Assim, para as rádio-emissões representadas em espectros com o eixo de frequência invertido, fica mais evidente o deslocamento da fonte na atmosfera solar, associado à deriva em frequência mostrada no espectro (DUTRA, 2010).

A partir do estudo das morfologias dos espectros dinâmicos de emissões, Wild e McCready (1950), dividiram *bursts* de ondas métricas em classes, denominadas:

---

<sup>2</sup>Ondas de Alfvén são ondas transversais que se propagam ao longo das linhas de campo magnético e podem ser geradas em qualquer fluido eletricamente condutor permeado por um campo magnético (por exemplo, Costa Jr et al. (2011))

Figura 6 - Exemplo espectro dinâmico com representação eixo frequência invertido.



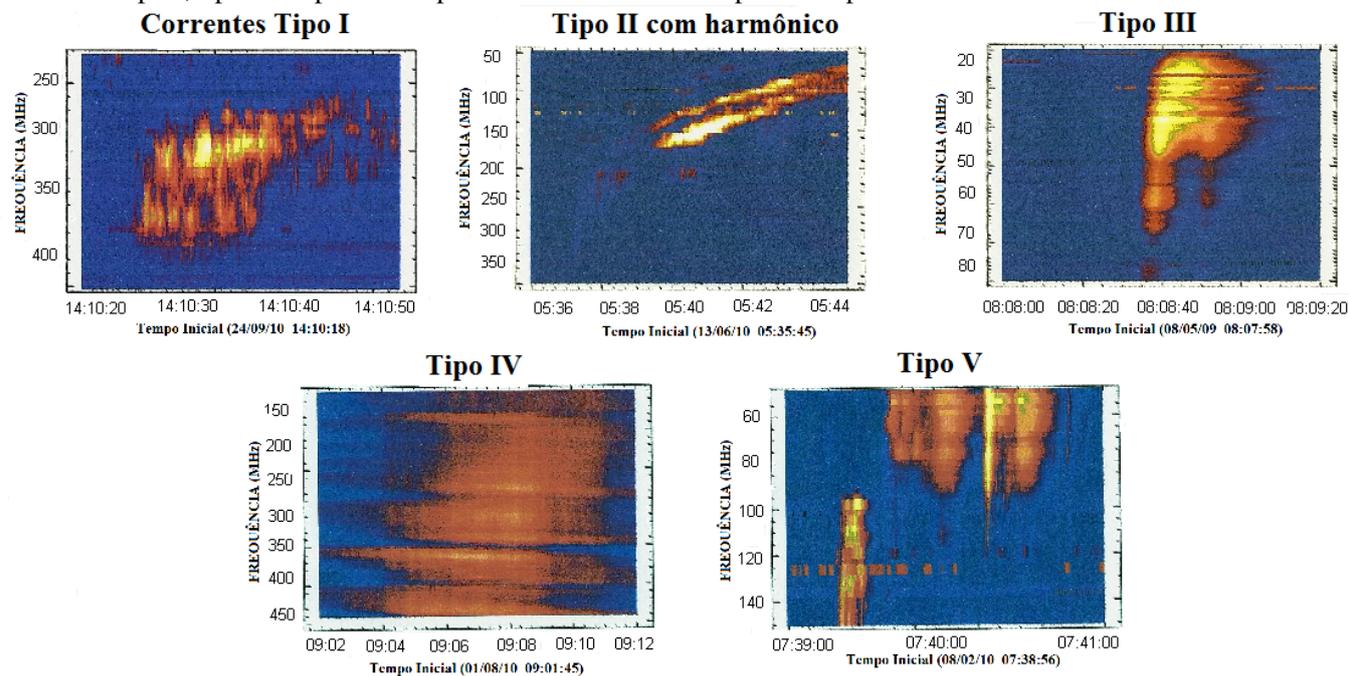
Fonte: Adaptado de: <http://www.e-callisto.org/>

- burst tipo I: apresenta banda estreita em frequência e curta duração, que ocorre devido à aceleração local dos elétrons até energias de algumas vezes a energia térmica e é acompanhado por uma emissão contínua de banda larga  $\approx 50 - 100$  MHz. Grupos de bursts tipo I tem duração total de horas ou até mesmo dias (tempestades de ruído);
- burst tipo II: caracterizado por apresentar um par de emissões harmônicas (no fundamental e segundo harmônico) com taxa de deriva lenta e largura de banda instantânea estreita. A emissão harmônica ocorre provavelmente devido à emissão de plasma dos elétrons acelerados dentro da frente de choque; a presença da deriva, de alta para baixa frequência, está associada ao movimento de uma onda de choque se propagando para fora, gerada pela liberação de energia durante um *flare* solar ou pelos efeitos de propagação de uma *CME*;
- burst tipo III: representa emissão intensa, com altas taxas de deriva em frequência (positiva ou negativa) e com duração total da ordem de minutos. Geralmente ocorrem em grupos e são atribuídas à emissão de plasma de feixes de elétrons acelerados durante um *flare* solar, que se deslocam ao longo de linhas de campo magnético com energia cinética entre 10 e 100 keV e velocidades da ordem de 0,3 c;
- burst tipo IV: são classificados em estacionários e não-estacionários. As emissões tipo IV estacionárias caracterizam-se como uma tempestade que sucede um *flare* solar de grande dimensão, com duração de  $\approx 1$  hora após a fase impulsiva. O evento inicia-se geralmente intenso e com poucas emissões, evoluindo posteriormente em tempestade tipo I, sem deslocamento da fonte emissora. As emissões tipo IV não-estacionárias estão associadas a uma fonte de emissão contínua em movimento, que pode afastar-se do Sol a grandes distâncias, diminuindo após uma distância de  $\approx 1$  raio solar, podendo durar cerca de 10 minutos ou mais, interpretadas como assinaturas de plasmóides em movimento ejetados durante um *flare* e

- burst tipo V: caracterizado por períodos de emissão contínua ( $\approx 10$  s a 2 min) iniciados durante ou logo após um grupo de emissões tipo III. São intensos e duradouros na faixa de frequência de 20 a 100 MHz e provavelmente gerados pela remoção de elétrons dos feixes associados às emissões tipo III (WILD, 1985; RAOULT et al., 1990).

Um resumo das propriedades das emissões métricas é dado na Tabela 5 e a Figura 7 mostra os espectros dinâmicos com exemplos típicos dos tipos de emissão registradas em ondas métricas.

Figura 7 - Espectro dinâmico de emissões em ondas métricas: da esquerda para a direita superior: emissões tipo I, tipo II e tipo III. Na parte inferior: emissões tipo IV e tipo V.



Fonte: Adaptado de Monstein (2011).

Tabela 5 - Rádio emissões solares em ondas métricas.

Tipo	Largura de Banda (MHz)	Duração (s)	Fonte provável de energia	Mecanismo de emissão sugerido
I	4*	1*	dinâmica coronal	turbulência ondas plasma
II	4	300	ondas choque	turbulência choque
II	20	2	feixe elétrons	instabilidade <i>bump on tail</i>
III	100	2	feixe elétrons	instabilidade <i>bump on tail</i>
IV	200	1000	-	instab. cone perda (inconclusivo)
V	30	20	instab. de feixe	inconclusivo

Fonte: Adaptado de Benz et al. (2009).

\* Largura de banda e duração típicas para uma frequência média de 200 MHz.

Exceto para as emissões tipo III, os mecanismos de emissão para os *bursts* métricos ainda

apresentam incertezas, apesar de serem geralmente assumidos como não térmicos. Detalhes podem ser obtidos nas referências de revisão: (KUNDU, 1965; KRÜGER, 1979; MCLEAN; LABRUM, 1985b).

### 2.3 Emissão Tipo I

Elgaroy (1961), estudando emissões tipo I, encontrou propriedades espectrais distintas para as mesmas. Assim, ele as dividiu nas seguintes subclasses:

- tipo I(s): *burst* estável, sem deriva em frequência;
- tipo I(d): *burst* com deriva de frequência de alta para baixa;
- tipo I(r): *burst* com deriva em frequência reversa, isto é, de baixa para alta frequência;
- tipo I(c): *burst* curvado, deriva de frequência irregular;
- tipo I(o): *burst* com oscilação de frequência média;
- tipo I(f): *burst* de banda estreita com deriva de frequência rápida. Tipo I(fd) significa deriva rápida, enquanto I(fr) significa deriva rápida reversa;
- tipo I(x): casos dúbios, não passíveis de classificação.

Mangney e Veltri (1976) resumiram as principais características de *bursts* tipo I:

- curta duração de 0,1 a 3 s, diminuindo com a frequência;
- esta atividade ocorre em regiões ativas acima de manchas solares; entretanto, as tempestades de ruído não estão associadas com todas as regiões ativas, mas somente com as que parecem ter um forte campo magnético na coroa;
- largura de banda estreita (diminui com a frequência);
- sobrepostos em um contínuo de banda larga;
- alta polarização circular  $\approx 100\%$ ;
- variação da intensidade de 1 a 100 sfu (solar flux unit =  $10^{-22}$  W/m<sup>2</sup>Hz);
- a frequência deriva para alta ou para baixa frequência a uma razão de poucos décimos de MHz/s até 200 MHz/s;
- tendência a se agrupar em aglomerados de dezenas ou centenas formando correntes de banda estreita, que geralmente derivam lentamente em frequência.

### 2.4 Correntes Tipo I

Wild e Tlamicha (1964), Wild e Tlamicha (1965) reportaram as características espectrais de rádio emissões que encontraram repetidamente durante o ciclo solar 19 (de fevereiro de 1954 a outubro de 1964), que chamaram de correntes.

Tempestades de ruído, quando observadas por instrumentos com alta resolução espectral e temporal, apresentam uma aparência complexa. Para distinguir uma corrente tipo I de um aglomerado

de *bursts* aleatórios, Elgaroy e Uglan (1970) adotaram algumas características como regras para sua identificação:

- uma corrente não pode conter menos que 4 *bursts* individuais;
- uma corrente deve ter duração de 2 s ou mais;
- o tempo de separação entre *bursts* sucessivos em uma mesma corrente deve ser menor que 1 s;
- correntes sucessivas devem ter mais ou menos a mesma frequência central ( $\pm 5\%$ ).

Para Groot et al. (1976), os critérios para definir uma corrente são:

- sequência aparentemente coerente de *bursts* no domínio espectro-temporal, em que frequências centrais são colineares;
- o tempo de separação entre *bursts* sucessivos deve ser menor que 3 segundos;
- uma corrente deve conter no mínimo 5 *bursts* tipo I.

Outras características importantes das correntes são (ELGARROY; UGLAND, 1970):

- *bursts* fortes podem ocorrer a qualquer momento em uma corrente, mas há uma tendência estatística para *bursts* no final das correntes serem menos intensos que aqueles próximos ao seu início;
- *bursts* individuais em uma corrente podem apresentar diferentes derivas em frequência;
- algumas correntes são muito complexas. Dois ou três *bursts* podem ser observados quase simultaneamente em frequências ligeiramente diferentes;
- *bursts* individuais nas correntes refletem as mesmas propriedades que aqueles que ocorrem fora das mesmas.

A Figura 8 mostra um espectro esquemático para ilustrar o *burst* tipo I, uma corrente tipo I e uma tempestade de ruído.

Para Elgaroy e Uglan (1970), correntes podem ser produzidas em três diferentes processos: por efeitos de propagação que limitem a emissão de escape de uma fonte de banda larga; por excitação de uma única região fonte; ou por excitações de regiões fonte que são sistematicamente deslocadas.

Ao investigar correntes tipo I, Hanasz (1966), analisou várias características, entre elas, sua distribuição com a frequência média, razão de deriva em frequência, posição no disco solar e tempo de vida, e não encontrou distinção entre propriedades físicas de correntes e *bursts* simples.

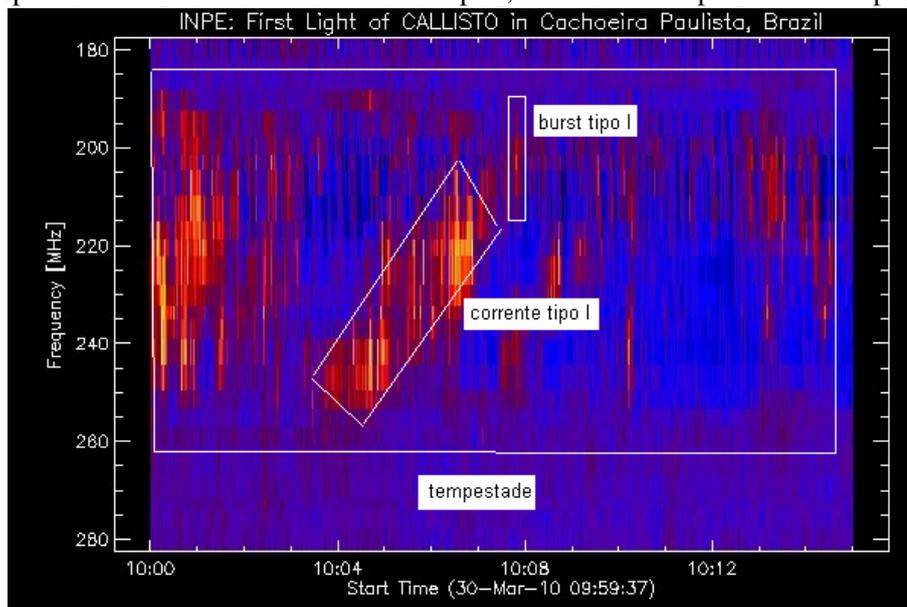
Sendo assim, Hanasz (1966) sugere que, primeiro se entenda os mecanismos de correntes tipo I, para então considerar *bursts* simples como um caso limite de correntes.

Sodré et al. (2011), Sodré et al. (2012) identificaram rádio emissões solares apresentando características de correntes tipo I (tendo como referência as características utilizadas por Elgaroy e Uglan (1970)) e apresentaram resultados da análise de seus espectros dinâmicos.

## 2.5 Tempestades de Ruído (RNS)

Conforme mencionado anteriormente, as tempestades de ruído se caracterizam por uma rádio emissão solar de longa duração em comprimento de onda métrico (30 MHz a 300 MHz) ou decamétrico (3 MHz a 30 MHz) composta de milhares de *bursts* de curta duração sobrepostos a um contínuo (KAI et

Figura 8 - Espectro dinâmico ilustrando um burst tipo I, uma corrente tipo I e uma tempestade de ruído.



Fonte: Adaptado de: [http://e-callisto.blogspot.com.br/2010\\_04\\_01\\_archive.html](http://e-callisto.blogspot.com.br/2010_04_01_archive.html).

al., 1985).

A longa duração é uma das características que distingue tempestades de outros tipos de emissão solar em rádio. Elas consistem de numerosos *bursts* de curta duração e é plausível que se suponha que cada um desses *bursts* corresponda a uma aceleração de elétrons supratérmicos (KAI et al., 1985).

Essas tempestades aparecem somente numa limitada faixa de frequências, que, segundo Malville (1962), raramente está acima de 350 MHz ( $\lambda = 0,8$  m) ou abaixo de 150 MHz ( $\lambda = 2,0$  m). Assumindo que a frequência de emissão das fontes de tempestades tipo I está próxima do nível de plasma local correspondente, esta distribuição indica que tempestades tipo I são um fenômeno da média coroa (KAI et al., 1985).

Os principais parâmetros observacionais de uma tempestade tipo I são:

- largura de banda: desde algumas dezenas de MHz até  $\approx 100$  MHz, o que sugere que a fonte da tempestade está confinada em um intervalo de altura relativamente pequeno na coroa solar. A largura de banda extremamente estreita de *bursts* individuais pressupõe que a aceleração de elétrons ocorre sobre uma distância muito pequena dentro da região de origem da tempestade (KAI et al., 1985);
- tempo de vida: o tempo de vida médio de *bursts* individuais aumenta com a diminuição da frequência. Tanto o tempo de vida curto quanto a largura de banda estreita sugerem que elétrons acelerados perdem sua energia numa curta distância. O aumento do tempo de vida com a diminuição da frequência central sugere que o aumento de altitude na coroa corresponde a um aumento no tempo de relaxamento de feixes de elétrons ou ondas de plasma excitados pelo feixe (KAI et al., 1985);
- deriva de frequência: Elgaroy (1961) encontrou que *bursts* tipo I podem apresentar deriva de frequência positiva ou negativa, e uma única tempestade pode conter uma mistura de *bursts* com deriva positiva ou negativa. Estes resultados sugerem que os elétrons acelerados responsáveis pelos

*bursts* podem fluir para cima ou para baixo na região de origem, ou podem ser aprisionados num nível de frequência de plasma constante.

### 2.5.1 Mecanismo de Emissão de Tempestades Tipo I

As tempestades tipo I são muitas vezes, ou quase sempre, iniciadas pela introdução de novas estruturas magnéticas em campos magnéticos coronais pré-existentes; isto significa que os campos magnéticos coronais mudam muito rapidamente na direção de fora para dentro da nova estrutura magnética. Não está claro como a energia é criada e liberada na coroa. A principal concepção vigente pode ser sumarizada em três possíveis cenários:

- campos magnéticos recém emergidos podem interagir com campos coronais pré-existentes e a reconexão pode liberar energia magnética livre (BENZ; WENTZEL, 1980);
- o campo magnético e a energia emergindo podem mover-se na coroa por choques propagando-se aproximadamente à velocidade de Alfvén. Elétrons podem ser acelerados na frente de choque ou pela coalescência de ondas de Alfvén se propagando em direções opostas (TAKAKURA, 1963) e emitir *bursts* de radiação em regiões de instabilidade cinética (SPICER et al., 1981; BENZ; WENTZEL, 1981; WENTZEL, 1981);
- a energia pode ser liberada na baixa coroa e ser transportada por partículas ou ondas (KRUCKER et al., 1995).

A Figura 9 mostra um modelo do mecanismo de emissão de tempestades tipo I, baseado na interação de campos magnéticos emergentes e campos/arcs magnéticos pré-existentes.

De acordo com o modelo de McLean (1981), a região fonte de tempestades tipo I é em forma colunar, emitindo diferentes frequências em diferentes alturas na coluna, ou sobre um vasto intervalo de latitudes na coroa solar, como evidenciado por Gnezdilov (1988) a partir de observações de tempestades durante um eclipse solar. A Figura 10 apresenta um modelo da geometria da região fonte de tempestades tipo I ilustrando sua estrutura colunar.

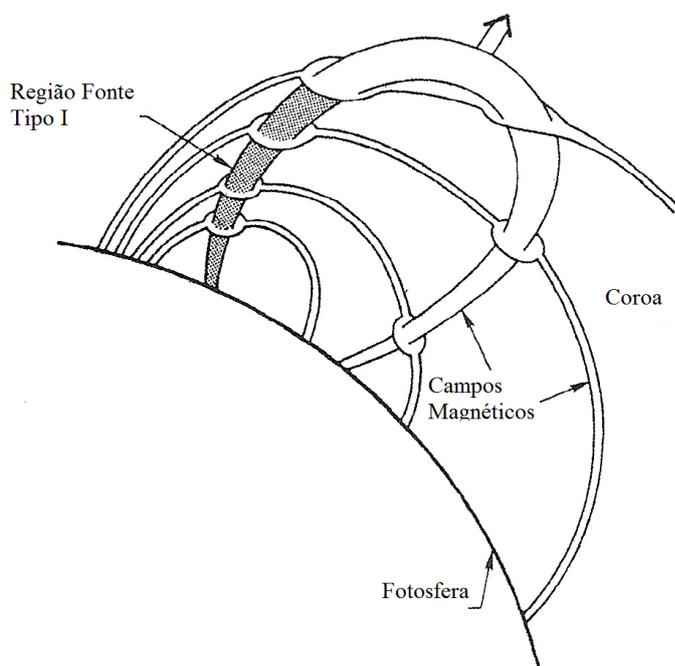
De acordo com Lang e Willson (1987), a estrutura complexa observada por eles em uma RNS era difícil de conciliar com a geometria simples do modelo colunar.

Diversos outros autores sugeriram modelos para explicar as particularidades registradas nas observações de emissões tipo I e tempestades tipo I, entre eles estão os trabalhos de:

- Melrose (1973): emissão fundamental de plasma;
- Melrose (1980): coalescência das ondas de Langmuir com ondas de baixa frequência;
- Benz e Wentzel (1980): espalhamento das ondas de Langmuir por ondas íon-acústicas;
- Benz e Wentzel (1981): coalescência das ondas plasma com ondas íon-acústicas;
- Wentzel (1981): combinação ondas híbrido-inferior com ondas híbrido-superiores e
- Thejappa (1991): emissão espontânea de ondas de Langmuir por distribuição anisotrópica de elétrons em campos magnéticos fechados acima de regiões ativas.

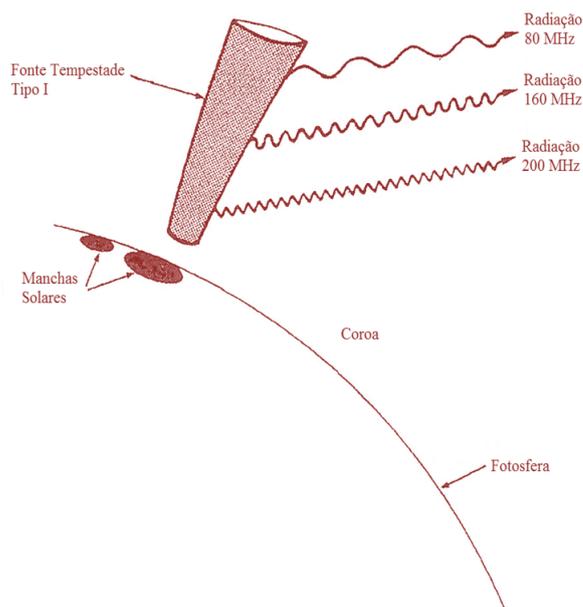
Em geral, as RNS parecem estar associadas com a emergência de novos materiais na coroa e/ou algum tipo de reestruturação magnética (BENTLEY et al., 2000). Tais rearranjos de campo magnético

Figura 9 - Modelo do mecanismo de emissão de tempestades tipo I. Um novo arco magnético move-se num campo magnético coronal pré-existente. Os campos novo e antigo serão separados por uma região de alta densidade de corrente. Onde os campos são fortes, a densidade de corrente atingirá o valor crítico para a geração da turbulência íon-acústica que em última instância resulta na emissão de radiação eletromagnética.



Fonte: Adaptado de McLean (1981).

Figura 10 - Modelo da geometria da região fonte de tempestades tipo I ilustrando sua estrutura colunar.



Fonte: Adaptado de McLean (1981).

ocorrem através do processo de reconexão magnética, que resulta na liberação de energia e consequente aquecimento/aceleração de partículas. Fluxos magnéticos emergindo na coroa podem também dirigir um

conjunto de choques fracos, que podem acelerar elétrons (SPICER et al., 1982).

A maior parte dos tratamentos teóricos das RNS simplesmente "assumem" a presença de elétrons não térmicos e seguem a partir disso. Distribuição de elétrons não térmicos têm uma anisotropia na velocidade e/ou espaço físico, que emite uma intensa população de ondas de Langmuir (MELROSE, 1975; MELROSE, 1987; MELROSE, 1980).

A anisotropia pode ser vista como uma fonte de energia livre, energia essa que é dada a uma população de ondas de Langmuir. As ondas de Langmuir, ou ondas de plasma, compreendem oscilações físicas do plasma, que coalescem com uma população adequada de ondas de baixa frequência de modo a produzir a emissão eletromagnética observada (WENTZEL, 1986).

Mercier et al. (2015) investigaram a estrutura das RNS com foco na relação da posição e altitude das mesmas com a frequência no limite inferior de seus tamanhos. Para tanto, utilizaram dados do *Nançay Radioheliograph* (NRH) e do *Giant Meterwave Radio Telescope* (GMRT) para obter imagens de alta resolução e investigar a estrutura fina das RNS. Usando dados do NRH de vários dias consecutivos derivaram a altitude da RNS em diferentes frequências, encontrando distâncias heliocêntricas de  $\approx 1,20$  e  $1,35 R_{\odot}$ , a 432 e 150 MHz, respectivamente, mostrando que ela é menor do que no ambiente coronal, implicando que as regiões coronais que emitem em diferentes frequências não se posicionam ao longo do mesmo tubo de fluxo magnético, o que questiona o clássico modelo colunar e também as teorias atuais para o mecanismo de aprisionamento magnético de elétrons. Levando em conta que existem poucas observações confiáveis com alta resolução espacial, concluem que é difícil dizer se essas medidas são reais. Observar as RNS em várias longitudes solares com alta resolução espacial ( $<10$  arcsec) e temporal ( $<1$  s) poderia ser útil para responder questões sobre o mecanismo das RNS, suas variações espaciais e temporais e a turbulência, o que não é possível com os instrumentos em operação atualmente.

Levando em conta que as teorias atuais são limitadas pelo pouco conhecimento acerca da turbulência, o estudo desta através dos espectros de potência e dissipação aparece como um caminho na tentativa de entendimento das RNS.

## 2.6 A Teoria de Kolmogorov

A teoria de Kolmogorov descreve como a energia é transferida de grandes para pequenos vórtices; quanta energia é armazenada por vórtices de determinado tamanho, e, quanta energia é dissipada pelos vórtices de cada tamanho. A teoria baseia-se em três importantes hipóteses, combinando argumentos dimensionais e observações experimentais (BAKKER, 2002)

### 2.6.1 Hipótese da isotropia local

Para a turbulência homogênea, a energia cinética turbulenta  $\kappa$  é a mesma em todos os lugares. Para a turbulência isotrópica os vórtices também se comportam da mesma forma em todas as direções.

Kolmogorov argumentou que a tendência direcional das grandes escalas se perdem no processo caótico de redução de escala à medida que a energia é transferida para vórtices menores sucessivamente (BAKKER, 2002).

Daí a hipótese de Kolmogorov de isotropia local afirma que a números de Reynolds suficientemente elevados, os movimentos turbulentos de pequena escala são estatisticamente isotrópicos. Aqui, o termo isotropia local significa isotropia em pequenas escalas. A turbulência em grande escala pode ainda ser anisotrópica (BAKKER, 2002).

### 2.6.2 Hipótese da Primeira Similaridade

Kolmogorov também argumentou que não só a informação direcional se perde, como a energia é transferida em forma de cascata, mas que todas as informações sobre a geometria dos vórtices se perde também. Como resultado, as estatísticas dos movimentos em pequena escala são universais: são semelhantes em cada fluxo turbulento de número alto de Reynolds, independente do campo de fluxo médio e das condições de contorno (BAKKER, 2002). Estes vórtices de pequena escala dependem da taxa  $T_{EI}$  na qual recebem energia das escalas maiores (que é aproximadamente igual à taxa de dissipação  $\epsilon$ ) e da dissipação viscosa, que está relacionada com a viscosidade cinemática  $\nu$ .

*A hipótese da primeira similaridade de Kolmogorov afirma que em cada fluxo turbulento com número de Reynolds suficientemente elevado, as estatísticas dos movimentos de pequena escala têm uma forma universal que é determinada unicamente por  $\epsilon$  e  $\nu$ .*

### 2.6.3 Escalas de Kolmogorov

Dado os dois parâmetros  $\epsilon$  e  $\nu$  podemos formar as seguintes escalas de comprimento, velocidade e tempo únicas:

Escala de comprimento:

$$\eta = \left(\frac{\nu^3}{\epsilon}\right)^{\frac{1}{4}} \quad (1)$$

Escala de velocidade:

$$\mu_\eta = (\epsilon\eta)^{\frac{1}{4}} \quad (2)$$

Escala de tempo:

$$\tau_\eta = \left(\frac{\nu}{\epsilon}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$\left(\frac{\mu}{\eta}\right) = \frac{1}{\tau_\eta} \quad (4)$$

$$Re_\eta = \frac{\eta\mu_\eta}{\nu} = 1 \quad (5)$$

Estas escalas são indicativas dos menores vórtices presentes no fluxo, a escala na qual a energia é dissipada. Note-se que o fato de que o número de Reynolds de Kolmogorov ( $Re_\eta$ ) dos pequenos vórtices é 1, e é consistente com a noção de que a cascata prossegue para escalas menores e menores até que o número de Reynolds seja pequeno o suficiente para que a dissipação seja efetiva (BAKKER, 2002).

## 2.7 O Espectro de Energia ou Espectro de Potência

A turbulência pode ser considerada como constituída por turbilhões ou vórtices de diferentes tamanhos. Um vórtice é um movimento turbulento, localizado sobre uma região de tamanho  $\ell$ , região esta que também pode conter vórtices menores. Os grandes vórtices são instáveis e se rompem, transferindo energia para os pequenos vórtices (BAKKER, 2002).

A energia cinética turbulenta  $K$  é determinada como a energia que é distribuída entre os vórtices de diferentes tamanhos.

Essa determinação geralmente é feita considerando o espectro de energia  $E(\kappa)$ , que é a energia contida num vórtice de tamanho  $\ell$  e número de onda  $\kappa$ , definido na Equação 12.

O número de onda  $\kappa$  é definido como:

$$\kappa = \frac{2\pi}{\ell} \quad (6)$$

Através do espectro de energia (ou espectro de potência  $E(\kappa)$ ), determina-se para quais escalas espaciais a dissipação de energia magnética ocorre (ABRAMENKO; YURCHYSHYN, 2010).

$$E(\kappa) \sim \kappa^{-\alpha} \quad (7)$$

A lei de potência do espectro de energia magnética representa a distribuição da energia magnética sobre escalas espaciais e quantifica a turbulência na AR (ABRAMENKO et al., 2001).

Por definição,  $K$  é a integral de  $E(\kappa)$  sobre todos os números de onda:

$$K = \int_0^{\infty} E(\kappa) dE(\kappa) \quad (8)$$

A teoria de Kolmogorov (KOLMOGOROV, 1941) supõe que a cascata de energia segue um caminho: de grandes a pequenos vórtices. Estudos experimentais mostraram que a energia também é transferida de escalas menores para escalas maiores (um processo chamado retroespalhamento), embora em uma taxa muito menor, e a transferência de energia dominante é, de fato, de grande a pequena escala. Nessas pequenas escalas a energia cinética da turbulência é convertida em calor. A pesquisa sobre os aspectos fundamentais da turbulência continua, tanto experimentalmente quanto por meio de grandes simulações computacionais usando simulação numérica direta DNS (do inglês direct numerical simulation); a teoria continua a ser refinada.

## 2.8 Espectro de Dissipação Magnética

O espectro de dissipação magnética representa a distribuição de estruturas dissipativas sobre muitas escalas espaciais e é um *proxy* razoável para a estatística das estruturas atuais em uma AR. O espectro permite testar o estado da turbulência.

Para turbulência totalmente desenvolvida (alto número de Reynolds) a maior parte da dissipação de energia magnética ocorre em pequenas escalas, enquanto a entrada de energia ocorre em grandes escalas, e as cascatas de energia de grandes a pequenas escalas ocorrem sem quaisquer perdas.

Quando o intervalo de entrada de energia e o intervalo de dissipação se sobrepõem, a dissipação ocorre em escalas intermediárias ao longo da cascata. Esta condição ocorre em estados de turbulência subdesenvolvida (baixo número de Reynolds), quando estruturas de grande escala podem interferir com a cascata turbulenta em pequenas escalas.

O espectro de dissipação de energia magnética é definido como (BISKAMP et al., 1996):

$$E_{dis}\kappa = 2\eta\kappa^2 E(\kappa), \quad (9)$$

onde  $\eta$  é o coeficiente de difusividade magnética. Como  $E$  e  $E_{dis}$  têm diferentes dimensões, a razão de dissipação de energia magnética ( $\frac{\langle \xi \rangle}{\eta}$ ) é normalizada pela difusividade magnética e derivada como (BISKAMP et al., 1996)

$$\frac{\langle \xi \rangle}{\eta} = 2 \int_0^{\infty} \kappa^2 E \kappa d\kappa \quad (10)$$

A função  $\kappa^2 E(\kappa)$  é derivada de observações, proporcional ao espectro de dissipação, assumindo que  $\eta$  é uniforme sobre toda área da AR.

Segundo Abramenko e Yurchyshyn (2010), quando campos magnéticos fotosféricos estão em um estado de turbulência subdesenvolvido, tanto a cascata de energia quanto a dissipação de energia em todas as escalas estão presentes no sistema.

### 3 INSTRUMENTAÇÃO E DADOS

Neste Capítulo, os dados e instrumentos utilizados são descritos, bem como os programas empregados para tratar os dados.

#### 3.1 Dados

Os dados usados nesse estudo vieram das seguintes fontes:

- dados digitais de radioemissões solares na faixa de 45 – 870 MHz da rede e-CALLISTO, disponíveis pela Internet <<http://soleil.i4ds.ch/solarradio/callistoQuicklooks/>>
- dados de *flares* solares e de atividade solar associada (desde 1996) disponibilizados pelo SWPC (*Space Weather Prediction Center*), disponíveis em <<http://www.swpc.noaa.gov/ftpmenu/warehouse.html>>;
- dados de *flares* solares em raios-X (*Solar Data Analysis Center* – SDAC): GOES.
- dados de EUV (ultra-violeta (AIA 171) e
- magnetogramas (HMI)

#### 3.2 Ferramentas Computacionais

As ferramentas utilizadas na análise dos dados são:

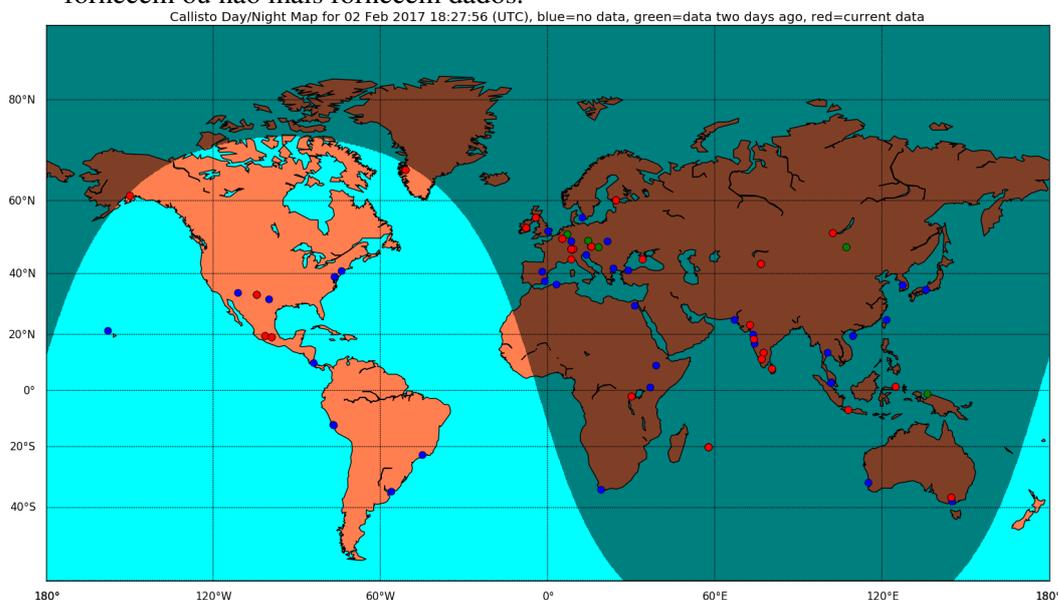
- Programa Callisto-View para visualização e pré-processamento dos dados de emissões solares na faixa 45-870 MHz da rede e-CALLISTO;
- Python - Linguagem de programação de alto nível que possui um modelo de desenvolvimento comunitário e aberto;
- SunPy - Ambiente de análise de dados especializada no fornecimento do software necessário para analisar os dados solares e Heliosférico em Python. Atualmente ele suporta dados de imagem de grandes missões solares (por exemplo, SDO, SOHO, STEREO, e IRIS), dados de séries temporais de missões, tais como GOES, SDO/EVE, e PROBA2/LYRA, e espectros de rádio de e-Callisto e STEREO/SWAVESe
- IDL - Linguagem de programação científica que permite ao usuário , importar os mais diversos formatos de dados, processar e visualizar esses dados em forma de gráficos 2D e 3D, superfícies, imagens e animações.

#### 3.3 A rede e-CALLISTO

A rede e-CALLISTO foi idealizada durante o Ano Internacional Heliosférico (2007) com o intuito de monitorar continuamente a atividade solar durante as 24 horas do dia. Para tanto, espectrômetros têm sido instalados em vários locais do mundo. De acordo com informações fornecidas pelo site da rede ([www.e-callisto.org](http://www.e-callisto.org)), em dezembro de 2016, a rede e-CALLISTO contava com 133 espectrômetros em 67 localizações e usuários em mais de 132 países. A Figura 11 ilustra a configuração da rede em dezembro de 2016.

Cada espectrômetro CALLISTO é composto por um receptor de duplo canal baseado em eletrônica disponível comercialmente. Sua principal característica é o baixo custo do *hardware* e do *software* e o baixo tempo de montagem (BENZ et al., 2005). A largura de banda total de operação é 825

Figura 11 - Configuração da rede e-CALLISTO, em 02 de fevereiro de 2017. Os triângulos em vermelho representam estações fornecendo dados e as estrelas, em azul, as estações que ainda não fornecem ou não mais fornecem dados.



Fonte: <http://www.e-callisto.org/>

MHz. A faixa de frequência total é de 45 - 870 MHz. Há um canal individual de largura de banda 300 kHz, com resolução espectral de 62,5 KHz. O *software* é programado em linguagem C++. Para o tratamento dos dados, diversas rotinas foram escritas em IDL e Python. Os parâmetros relevantes são armazenados em arquivos de texto que podem ser facilmente adaptados a outras configurações de observação.

Com a distribuição dos diversos espectrômetros da rede, atualmente a cobertura para monitoramento solar é total ao longo do ano.

A Tabela 6 ilustra as principais especificações dos espectrômetros CALLISTO.

Tabela 6 - Principais especificações dos instrumentos da rede e-CALLISTO.

Parâmetro	Especificação
Faixa de Frequência	45 - 870 MHz
Resolução em Frequência	62,5 kHz
Resolução Temporal	1,25 ms
Largura de Banda Radiométrica	300 kHz a -3 dB
Faixa Dinâmica	≈ 50 dB
Sensibilidade	25/1 mV/dB
Figura de Ruído	< 10 dB
Taxa de Amostragem	800 a 1000 medidas s <sup>-1</sup>
Número de Canais	Selecionável de 1-500
Dados de Saída	1 arquivo FITS (15 min) e 1 arquivo log (diário)

Fonte: Adaptado de Benz et al. (2009).

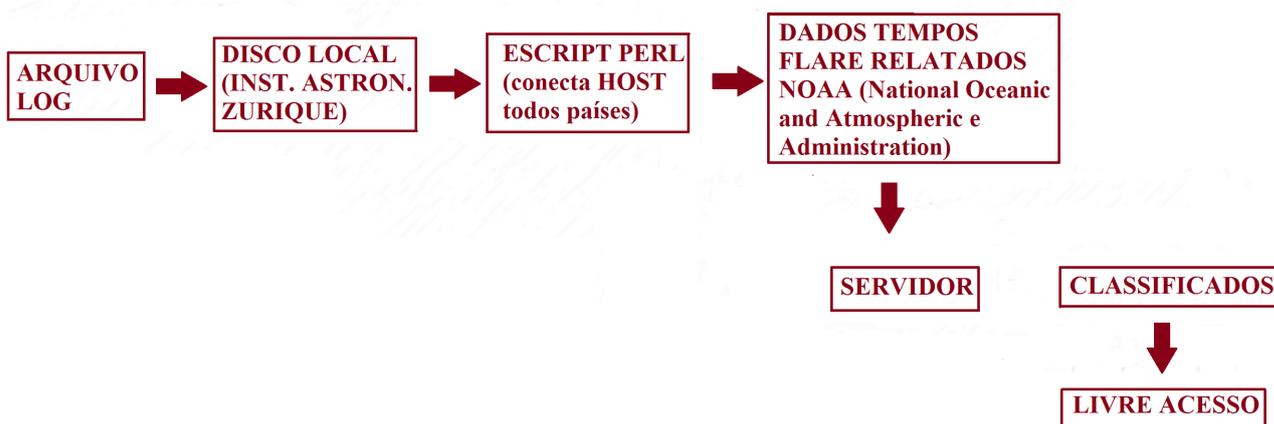
Os diversos espectrômetros que compõem a rede e-CALLISTO operam em conjunto com diferentes antenas e alimentadores, incluindo antenas parabólicas e log-periódicas. Portanto, devido às

diferentes áreas efetivas (área coletora), cada instrumento apresenta uma sensibilidade (mínima intensidade de fluxo detectável) e conseqüentemente diferente relação sinal ruído.

### 3.3.1 Aquisição de Dados da rede e-CALLISTO

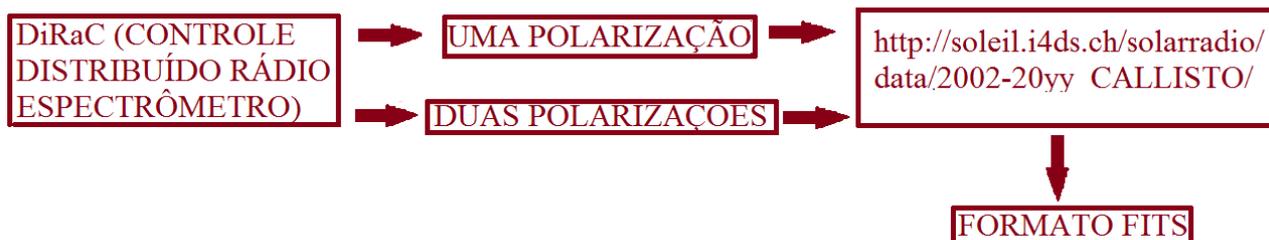
Os arquivos de dados (em formato FITS) e os arquivos de log de cada espectrômetro da rede e-CALLISTO gerados diariamente são primeiro armazenados em um disco de dados local. No caso do CALLISTO-BLEN (descrito na seção 3.4), os dados são armazenados no Instituto de Astronomia de Zurique, Suíça, que também abriga o servidor geral dos dados da rede. Depois da observação e aquisição de dados em cada estação, um script PERL (*Practical Extraction and Report Language*) rodando no servidor conecta cada *host* em todas as estações e reúne os arquivos de dados disponíveis. Os dados finalmente transferidos e armazenados são classificados e arquivados no servidor e passam a ser de livre acesso. A Figura 12 ilustra as etapas do processo de transferência, armazenamento e disponibilização dos dados.

Figura 12 - Etapas de aquisição e disponibilização de dados dos espectrômetros da rede e-CALLISTO contendo registros de atividade solar.



Todos os dados disponíveis são apresentados em um site usando uma interface em JAVA, chamado *Controle Distribuído de Rádio Espectrômetro (DiRaC)* e pode ser selecionado com uma ou duas polarizações (Figura 13).

Figura 13 - Diagrama representando a disponibilização dos espectros dinâmicos da rede e-CALLISTO contendo registros de atividade solar.



Existem duas maneiras de se acessar os espectrogramas disponibilizados pela rede, a partir dos

seguintes endereços eletrônicos:

- <<http://www.e-callisto.org>>, o link *Data and QuickLooks* > 2002 direciona o usuário para a página com opções de dados a partir do ano de 2002, em diretórios separados mês a mês e diários; os espectros podem ser visualizados (image) ou os dados baixados (FITS).
- <[http://soleil80.cs.technik.fhnw.ch/solarradio/data/2002-20yy\\_Callisto/](http://soleil80.cs.technik.fhnw.ch/solarradio/data/2002-20yy_Callisto/)>. Neste site, os dados também aparecem organizados em ano, mês e dia, porém cada arquivo disponível para *download* está compactado.

### 3.4 O CALLISTO-BLEN

O espectrógrafo denominado CALLISTO-BLEN está localizado em Zurique (Suíça), na latitude  $47^{\circ} 20' 23''$  N, longitude  $08^{\circ} 06' 41''$  L e altitude 495 m. O CALLISTO-BLEN opera com uma antena parabólica de 7 m de diâmetro em conjunto com um alimentador log-periódico no foco principal (Figura 14). Apesar desta antena permitir a operação em uma ampla faixa do espectro (100 MHz a 4 GHz), o CALLISTO-BLEN opera na faixa de 170 MHz a 870 MHz, com polarização vertical e horizontal.

Figura 14 - Antena de 7 m de diâmetro do CALLISTO-BLEN.



Fonte: <http://www.e-callisto.org/>

A resolução em frequência deste equipamento é 62,5 kHz, sua largura de banda radiométrica é 300 kHz e o tempo de integração é de 1,25 ms. Os dados das observações solares registrados pelo

CALLISTO-BLEN disponibilizados pela rede fornecem os espectros calibrados em unidades de fluxo solar (sfu).

### 3.5 GOES - *Geostationary Operational Environmental Satellite*

Os dados de raios-X do GOES são usados para rastrear a atividade solar e *flares* solares.

Os gráficos do fluxo de raios-X do GOES são de 6 horas e de três dias, e contém uma média de 1 e 5 minutos, respectivamente, em 1 - 8 Angstrom (0,1 - 0,8 nm) e 0,5 - 4,0 Angstrom (0,05 - 0,4 nm ). As medições de fluxo de raios-X através do GOES (1 - 8 Angstrom) têm sido feitas desde 1986 e, antes disso, pelos satélites SMS NOAA, desde 1974. Os plots são atualizados dinamicamente a cada minuto na página <<http://www.swpc.noaa.gov/products/goes-x-ray-flux>>.

### 3.6 SDO - *Solar Dynamics Observatory*

O SDO foi lançado em 11 de fevereiro de 2010, e fornece imagens em alta definição do Sol em 13 comprimentos de onda diferentes, utilizando dois instrumentos de imagem, o instrumento AIA (*Atmospheric Imaging Assembly*) e o *Helioseismic and Magnetic Imager* (HMI). Cada comprimento de onda foi escolhido para destacar uma parte específica da atmosfera do Sol, desde a superfície solar até a parte superior da coroa solar.

A Figura 15 fornece informações técnicas sobre a temperatura do plasma e a região da atmosfera solar associada, que são detectados pelos instrumentos do SDO.

O SDO contém um conjunto de instrumentos que fornecem observações que conduzem a uma compreensão mais completa da dinâmica solar que impulsiona a variabilidade no ambiente terrestre. Este conjunto de instrumentos:

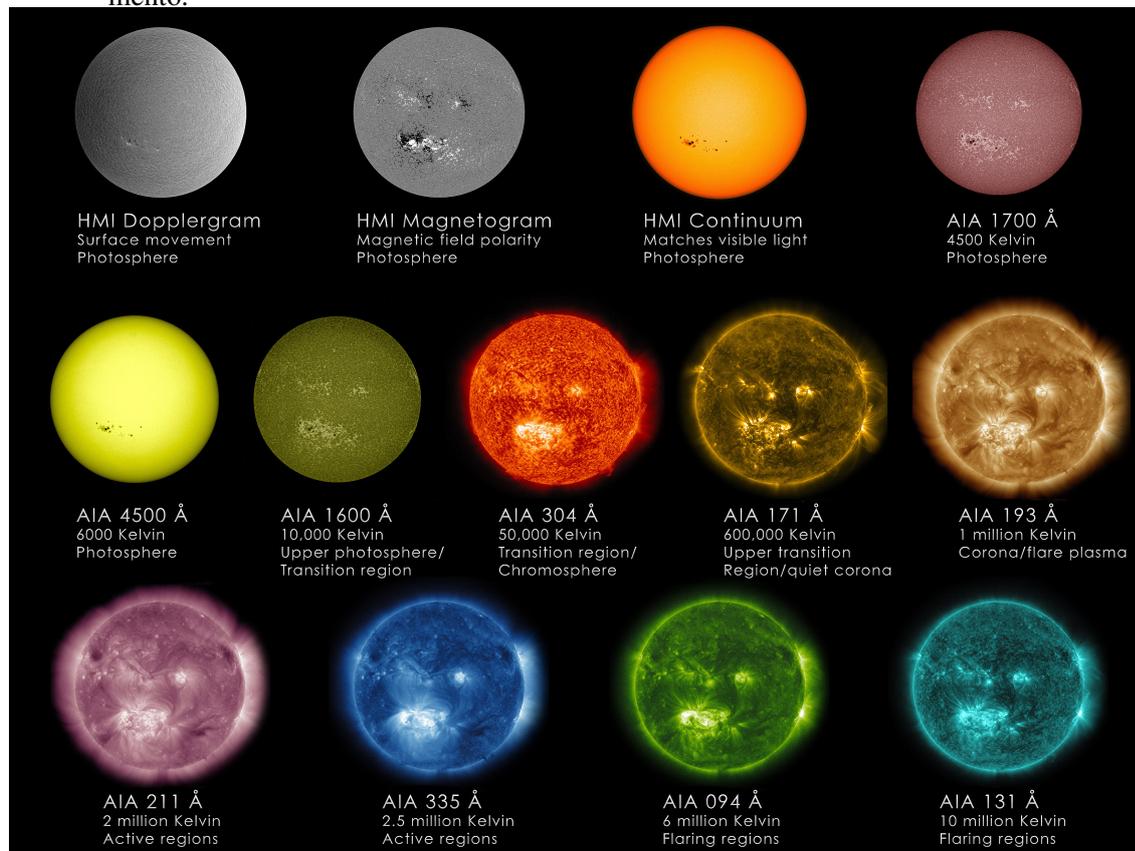
- mede a irradiância espectral ultravioleta extrema do Sol em uma cadência rápida;
- mede as mudanças Doppler devido a velocidades de oscilação sobre todo o disco visível;
- faz medições de alta resolução do campo magnético longitudinal e vetorial sobre todo o disco visível;
- faz imagens da cromosfera e coroa interior em várias temperaturas em uma cadência rápida e
- faz essas medições sobre uma parcela significativa de um ciclo solar para capturar as variações solares que podem existir em diferentes períodos de tempo de um ciclo solar.

#### 3.6.1 Observações em Ultravioleta/ AIA - *Atmospheric Imaging Assembly*

Imagens em ultravioleta podem fornecer observações da alta temperatura da baixa coroa. Temperaturas do plasma coronal calmo vão de  $\approx 1 \times 10^6$  K, até  $\approx 1 \times 10^7$  K e podem produzir ionização numa variedade de espécies de elementos pesados, tais como Fe, O, Mg, ou Si, por exemplo. Esses elementos ionizados são fortes emissores em comprimentos de onda ultravioleta e extremo ultravioleta. Todas as imagens da coroa em ultravioleta são feitas do espaço (LEMEN et al., 2012).

O SDO está em uma órbita geoestacionária a  $102^\circ$  W de longitude, inclinado em  $28,5^\circ$ . A bordo, o imageador ultravioleta, AIA, consiste em quatro telescópios Cassegrain que fornecem imagens completas do disco, da região de transição e da coroa até  $0,5 R_s$  acima da fotosfera com uma resolução espacial de  $0,6''$  e resolução temporal de 12 segundos em ultravioleta (UV), e ultravioleta extrema (EUV)

Figura 15 - Imagens do SDO exemplificando os vários comprimentos de onda registrados pelo instrumento.



Fonte: <[https://www.nasa.gov/sites/default/files/images/717632main\\_Sun-Wavelength-Chart\\_full.jpg](https://www.nasa.gov/sites/default/files/images/717632main_Sun-Wavelength-Chart_full.jpg)>

(LEMEN et al., 2012).

### 3.6.2 HMI - Helioseismic and Magnetic Imager

O objetivo principal do instrumento HMI é estudar a origem da variabilidade solar, caracterizar e compreender o interior do Sol e os vários componentes da atividade magnética. O HMI faz medições do movimento da fotosfera solar para estudar oscilações solares e medições da polarização em uma linha espectral específica para estudar os três componentes do campo magnético fotosférico. Produz dados para determinar as fontes e mecanismos internos da variabilidade solar e como os processos físicos dentro do Sol estão relacionados ao campo magnético da superfície e à atividade. Ele também produz dados para permitir estimativas do campo magnético coronal para estudos de variabilidade na atmosfera solar. As observações do HMI ajudam a estabelecer as relações entre a dinâmica interna e a atividade magnética. Por sua vez, isso levará a uma melhor compreensão da variabilidade solar e seus efeitos.

Os objetivos da investigação do HMI são observar e compreender estes processos interligados de atividade magnética e dinâmica interna, incluindo:

- dinâmica da zona de convecção e dínamo solar;
- origem e evolução das manchas solares e regiões ativas;
- fontes da atividade solar e distúrbios;

- ligações entre os processos internos e a dinâmica da coroa e heliosfera e
- precursores de perturbações solares para previsões meteorológicas espaciais.

O HMI observa o disco solar completo na linha de absorção de Fe I em 6173 Å com uma resolução de 1 segundo de arco.

O HMI mede uma longa seqüência de Dopplergramas (mapas da velocidade da superfície solar) e magnetogramas (mapas de campo magnético na superfície visível do Sol, a fotosfera). Cada mapa de movimento ou campo magnético é calculado no solo a partir de um conjunto de 12 imagens do Sol, cada uma obtida com uma combinação diferente de ajuste de comprimento de onda e direção de polarização.

### 3.7 Python

*Python* é uma linguagem de programação de alto nível, lançada por Guido van Rossum em 1991. Possui um modelo de desenvolvimento comunitário, aberto e gerenciado pela organização sem fins lucrativos *Python Software Foundation*. Uma de suas principais características é permitir a fácil leitura do código e exigir poucas linhas de código se comparado ao mesmo programa em outras linguagens. Devido as suas características, ela é principalmente utilizada para processamento de textos e dados científicos.

*Python* tem uma biblioteca padrão imensa, que contém classes, métodos e funções para realizar essencialmente qualquer tarefa, desde acesso a bancos de dados até interfaces gráficas. Também existem muitas ferramentas para lidar com dados científicos. Na maior parte das vezes, tudo que se precisa para rodar um programa está presente na instalação básica.

### 3.8 SunPy

*SunPy* é um pacote de software livre e de código aberto desenvolvido a partir de 28 de Março de 2011 por um pequeno grupo de cientistas e desenvolvedores na *NASA Goddard Space Flight Center*, para a física solar.

*SunPy* pretende ser uma alternativa livre para o ambiente de análise de dados *SolarSoft* que é baseado na linguagem de programação científica *IDL*. Embora *SolarSoft* seja *open-source*, o *IDL* não é, e pode ser proibitivamente caro. O objetivo do projeto *SunPy* é fornecer as ferramentas de software necessárias para que qualquer pessoa possa analisar os dados solares. É construído sobre o ambiente científico do *Python*, usando a linguagem do mesmo.

Com o apoio da *ESA Summer of Code* e do *Google Summer of Code*, bem como de colaboradores de todo o mundo, *SunPy* é agora um projeto global e não está associado a qualquer instituição individual.

Atualmente, ele suporta dados de imagem de grandes missões solares (por exemplo, SDO, SOHO (*Solar and Heliospheric Observatory*), STEREO (*Solar Terrestrial Relations Observatory*), e IRIS (*Interface Region Imaging Spectrograph*)), dados de séries temporais de missões, tais como GOES, SDO/EVE (*Extreme Ultraviolet Variability Experiment*), e PROBA2 (*Project for On-Board Autonomy*)/LYRA (*Lyman Alpha Radiometer*), e espectros de rádio de e-Callisto e STEREO/SWAVES.

Um exemplo de espectrograma da rede e-Callisto graficado com SunPy pode ser visto na Figura 16.

A Figura 17 mostra dados do GOES plotado com SunPy, com o qual pode-se escolher o horário, assim como no espectrograma, para efeito de análise comparativa.

Figura 16 - Espectro dinâmico do Callisto-BLEN plotado com SunPy, utilizando a ferramenta de subtração do background.

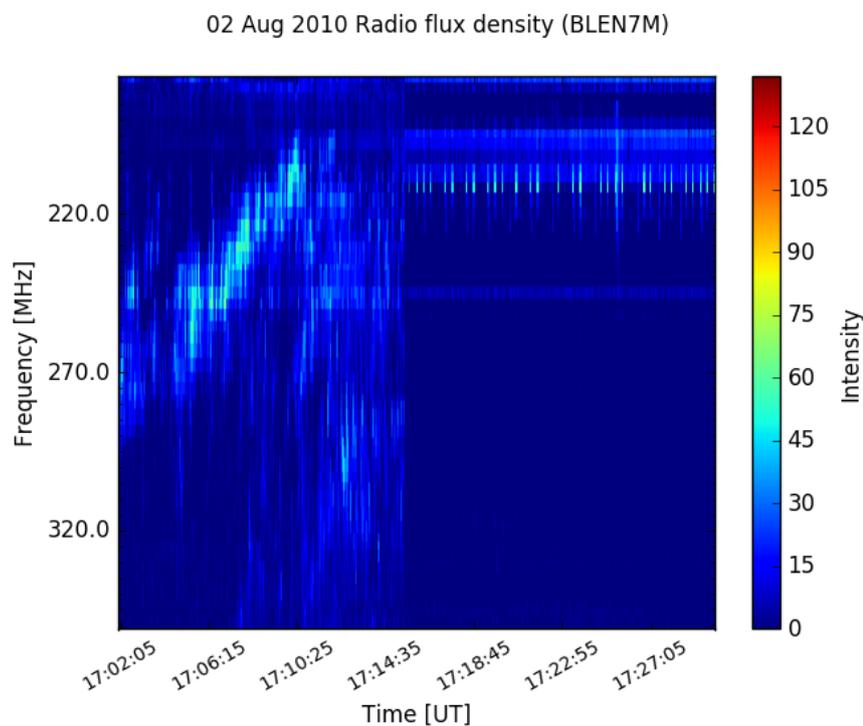
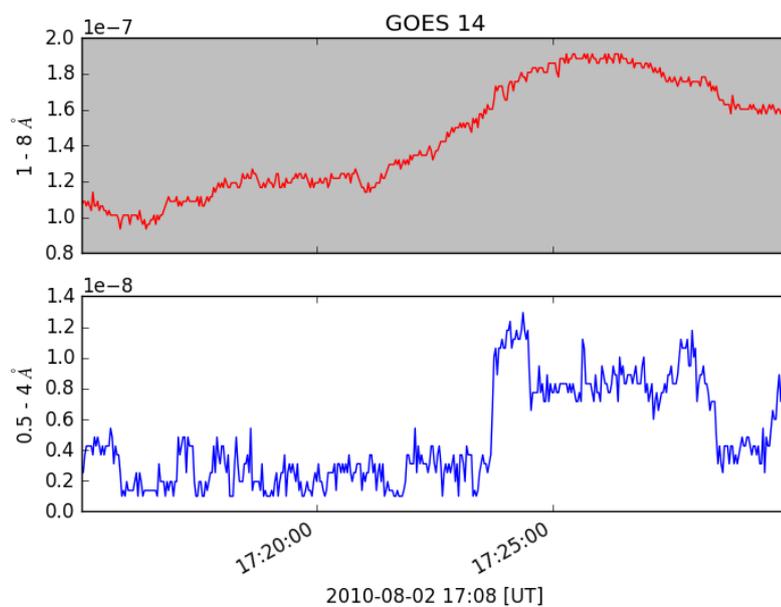


Figura 17 - Dados do GOES (entre 1715 UT e 1730 UT) plotado com SunPy.



### 3.9 IDL - Interactive Data Language

O *IDL* é uma linguagem de programação científica utilizada nas mais diversas áreas de pesquisa, sensoriamento remoto, áreas da saúde, física, astrofísica, engenharias, dentre outras, que permite o desenvolvimento desde pequenos e simples programas até as mais complexas aplicações.

O *IDL* permite ao usuário importar os mais diversos formatos de dados, processar e visualizar esses dados em forma de gráficos 2D e 3D, superfícies, imagens e animações.

### 3.10 SSW - SolarSoftWare

O sistema *SolarSoft* é um conjunto de bibliotecas de *software*, bases de dados e utilitários de sistema integrados que fornecem um ambiente comum de programação e análise de dados para a Física Solar. É principalmente um sistema baseado em *IDL*, embora algumas equipes de instrumentos integrem executáveis escritos em outras linguagens de programação (como o *python*, por exemplo) (BENTELY; FREELAND, 1998). O uso de bibliotecas, utilitários, técnicas e interfaces comuns minimiza a curva de aprendizado para os pesquisadores que estão analisando novos conjuntos de dados solares, correlacionando resultados de experiências múltiplas ou realizando pesquisas longe de sua instituição de origem.

A finalidade do *SolarSoft* é fornecer uma base sobre a qual construir. Quase toda missão precisa ser capaz de plotar variáveis no tempo, examinar e comparar dados de imagem, ou ajustar espectros. Não deve ser necessário reescrever tal *software* para cada nova missão. Um número significativo de rotinas existentes e bem comprovadas foram reunidas e são continuamente aprimoradas para fornecer um ponto de partida cada vez mais substancial (BENTELY; FREELAND, 1998).

Embora existam muitos, podemos resumir os principais objetivos do *SolarSoft* como sendo (BENTELY; FREELAND, 1998):

- promover o uso de normas que facilitem a análise coordenada dos dados: por meio do uso de padrões sugeridos, muitas rotinas poderosas estão imediatamente disponíveis para a análise de novos conjuntos de dados;
- fornecer um sistema de análise independente de *hardware* e site: o *software* compartilhado fundamental é escrito em uma forma independente do *hardware* e da configuração do site. Os utilitários de configuração do SSW suportam arquivos de configuração locais que personalizam o ambiente do usuário;
- fornecer uma grande biblioteca de *software* reutilizável: a biblioteca de *software* é a coleção central de rotinas úteis reunidas de muitas missões;
- fornecer acesso fácil a bases de dados auxiliares de suporte: o acesso a conjuntos de dados de suporte de observatórios solares terrestres e por satélite é fornecido em formatos consistentes para facilitar a análise coordenada e
- fornecer acesso integrado a outros pacotes IDL: quando bibliotecas IDL que fornecem uma extensão útil para capacidades SSW são identificadas, se possível, elas são integradas ao sistema SSW.

Algumas funções presentes no SSW são: análise de séries temporais, conversões de tempo, ajuste espectral, exibição de cubo de imagens e imagens (filmes), manipulação de dados IDL (estrutura, sequência de caracteres, matriz, matemática, etc), entre outras.

### 3.11 Software de Análise de Energia e Dissipação

No Capítulo 6, o processamento dos dados dos magnetogramas para a obtenção dos gráficos do espectro de potência magnética, da evolução temporal desse espectro, do espectro de dissipação e sua evolução temporal, foram feitos pelos doutores Cristiano M. Wrasse (Instituto Nacional de Pesquisas

Espaciais) e Jean C. Santos (Universidade Tecnológica Federal do Paraná). O detalhamento da metodologia utilizada por eles utilizada pode ser encontrada em (SANTOS; WRASSE, 2016).

## 4 EVOLUÇÃO DAS REGIÕES ATIVAS E A OCORRÊNCIA DE TEMPESTADES DE RUÍDO EM ONDAS MÉTRICAS

---

*Este Capítulo apresenta um levantamento estatístico sobre a ocorrência de RNS em dias com e sem a presença de flares solares em raios-X, e a duração das RNS nestas mesmas condições para os anos de 2010 a 2015. Ainda neste Capítulo, é investigada a evolução da região ativa NOAA 11476, observada entre 05 e 15 de maio de 2012, associada com RNS observadas no mesmo período, entre 5 e 16 de maio de 2012, totalizando um período de aproximadamente 20 horas de tempestades, registradas pela rede e-CALLISTO na faixa métrica (30 - 300 MHz). A descrição da evolução da AR em complexidade e área é apresentada e discutida em conexão com a ocorrência de RNS e sua intensidade, bem como os possíveis processos de reconexão magnética causados por mudanças na configuração da região ativa.*

---

### 4.1 Introdução

As tempestades de ruído (também chamadas tempestades tipo I) são a assinatura mais frequentemente observada que vem de populações de elétrons confinados em estruturas coronais em larga escala, consistindo em emissão contínua de banda larga (largura de banda comparável à frequência central) com duração entre  $\approx 1$  h e vários dias. Há muito tempo se sabe que as tempestades de ruído estão relacionadas especialmente com grandes grupos de manchas, preferencialmente os com algum grau de complexidade e com o estabelecimento de grandes sistemas de *loops* na média coroa. O seu aparecimento está, muitas vezes, relacionado com alterações distintas na coroa e com a liberação de energia semelhante à de um *flare* na região ativa e a sua evolução é acompanhada por alterações da posição da fonte, indicando a evolução súbita da estrutura coronal ou do local de aceleração de elétrons. Isto sugere que, como os *flares*, as tempestades de ruído são uma assinatura de aceleração de elétrons estendida no tempo e estão relacionadas com a evolução descontínua de campos magnéticos coronais (BENTLEY et al., 2000).

Análise feita por Sodré (2013) mostrou que quando da ocorrência dos *flares* mais energéticos e em maior número, verificou-se também um maior número de correntes tipo I (emissões que compõem as RNS). Esses dados indicam a existência de uma possível associação desses eventos, não como causa e efeito, mas devido ao fato de ambos os eventos estarem ligados às mudanças nas regiões ativas. Contudo, sabe-se que mesmo em dias sem o registro de *flares* pode-se encontrar a ocorrência de eventos tipo I, como os apresentados por Iwai et al. (2012). As emissões tipo I são iniciadas pelo processo de reconexão. Dessa forma, mesmo os processos de reconexão que não resultam em *flares* podem ter energia para desencadear emissões tipo I.

Existem estudos sugerindo que o nível de atividade das RNS diminui na presença de *flares* (AURASS et al., 1990), e outros, que sugerem a existência de uma fraca correlação entre RNS e *flares* solares em raios-X (BENZ et al., 2005).

Sendo assim, os objetivos deste Capítulo são:

- fazer um levantamento estatístico dos dias com e sem a presença de *flares* solares em raios-X, em conexão com a ocorrência e duração das RNS e
- investigar a evolução espacial e temporal das ARs, e a associação das RNS com a evolução dessas mesmas ARs.

## 4.2 Metodologia

Na página da NOAA (<<ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse>>) são listados diariamente os eventos registrados em ondas de rádio por uma rede de instrumentos, incluindo rádio telescópios e rádio espectrógrafos. A listagem informa os horários de início, de máxima intensidade e de fim de cada evento, a estação de observação, a frequência de registro e também a associação destes eventos com *flares* em raios-X moles, identificados pela classe de intensidade. Assim, um levantamento estatístico foi feito com o intuito de investigar a ocorrência de tempestades tipo I em dias com e sem a presença de *flares* solares em raios-X, e a duração das tempestades nestas mesmas condições para os anos de 2010 a 2015. Nesse levantamento foi considerado dia com *flare* os que apresentaram *flares* de classes C, M ou X, e dias sem *flare* os de classes A e B (com intensidades nas faixas entre  $10^{-5}$  [erg cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>] (A) e  $10^{-4}$  [erg cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>](B)). Da página do Solar Monitor (<<http://www.solarmonitor.org/>>) foram obtidos os dados sobre as regiões ativas para esse mesmo período. A evolução temporal em complexidade e a localização das Ars encontram-se em <[http://bass2000.obspm.fr/search\\_struct.php?step=2](http://bass2000.obspm.fr/search_struct.php?step=2)>.

Levando em conta a característica principal que distingue uma RNS de outros fenômenos solares em ondas métricas, ou seja, sua longa duração, foi realizado um levantamento nos dados dos espectrógrafos da rede e-CALLISTO, identificando-se a RNS registrada entre os dias 5 e 16 de maio de 2012 (com  $\approx$  20 horas de registros).

Para esse mesmo período foi identificada a AR que produziu mais eventos de *flares* em raios-X, a NOAA 11476, observada entre os dias 5 e 12 de maio de 2012.

A evolução magnética dessa AR foi analisada através dos magnetogramas registrados pelo instrumento HMI, e, uma comparação da evolução dos dados nos magnetogramas foi feita com a evolução da ocorrência da RNS.

## 4.3 Resultados

### - Levantamento estatístico:

Os resultados do levantamento estatístico sobre a ocorrência de RNS em dias com e sem a ocorrência de *flares* solares em raios-X são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Ocorrência de tempestades tipo I em dias com e sem *flares* solares em raios-X para os anos de 2010, 2011, 2012, 2013, 2014 e 2015.

Nº Dias	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Com <i>Flare</i>	07	51	68	74	72	42
Sem <i>Flare</i>	09	03	12	09	11	00

Fonte: <<ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse>>.

Pela Tabela 7, nota-se que em dias com a presença de *flares* solares ocorreram mais tempestades tipo I, o que contraria o relato de Zanna et al. (2011), de que as tempestades não estão associadas diretamente aos *flares*.

Também na presença de *flares*, exceto para o ano de 2010, observa-se o aumento na duração das tempestades em relação aos dias sem a ocorrência dos mesmos (Tabela 8).

Tabela 8 - Duração das tempestades tipo I mais longas em dias com e sem *flare* para os anos de 2010, 2011, 2012, 2013, 2014 e 2015. No ano de 2015 não foi registrada tempestade sem a presença de *flare*.

<b>Mais Duradura</b>	<b>2010</b>	<b>2011</b>	<b>2012</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>
Com	13/02	01/08	16/07	23/04	11/01	28/09
<i>Flare</i>	(5h00')	(09h46')	(16h11')	(12h33')	(13h16')	(8h58')
Sem	02/08	07/05	28/10	31/03	02/07	–
<i>Flare</i>	(6h58')	(5h37')	(8h13')	(4h16')	(5h22')	–

Fonte: <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse>.

A análise das AR envolvidas em cada uma das tempestades pode ser um caminho para entender essa aparente diferença entre os resultados aqui obtidos e os registrados por Zanna et al. (2011).

A Tabela 9 apresenta os parâmetros das AR existentes nos dias das tempestades mais duraduras para o ano de 2012 (com e sem a ocorrência de *flares*).

Tabela 9 - Parâmetros das regiões ativas (ARs) nos dias de tempestade tipo I mais duradura em 2012. O número entre parênteses refere-se à classificação da NOAA para a AR, neste caso, a de maior área e com maior número de manchas solares. A área da mancha solar é milionésimos da área do disco solar.

<b>Tempestade Mais Duradura</b>	<b>16/07 (com <i>flare</i>)</b>	<b>28/10 (sem <i>flare</i>)</b>
Nº AR	05	04
Classificação	$\beta\gamma\delta$	$\beta\delta$
Nº de Manchas	35 (11520)	11 (11598)
Área	960	330

Fonte: <http://bass2000.obspm.fr/search\_struct.php?step=2>.

- **Evolução da AR e a ocorrência de RNS:** No período analisado, a NOAA 11476 atravessava o disco solar. A configuração magnética da região passou de complexidade  $\beta$ , no dia 5, para  $\beta\gamma\delta$ , no dia 8. Da mesma forma, o número de manchas solares e a área da região ativa aumentaram (Tabela 10). Tempestades intensas foram gravadas pelo espectrógrafo CALLISTO-BLEN nos dias 10 a 14 (por exemplo, Figura 22), em que a configuração da região era complexa. Entretanto, nos dias 5 e 16 quando a configuração era  $\beta$  (simples) houve tempestades. Da mesma forma, entre 6 e 9, apesar da configuração magnética da AR apresentar complexidade de média ( $\beta\gamma$ ) a alta ( $\beta\gamma\delta$ ), nenhuma tempestade foi registrada pelo espectrógrafo CALLISTO-BLEN.

Um resumo dos resultados é apresentado na Tabela 10.

A Figura 18 apresenta a RNS do dia 05/05/2012 (entre 06:00 e 07:00 UT), registrada pelo espectrógrafo CALLISTO-BLEN7M, os dados do satélite GOES para essa mesma data são apresentados na Figura 19, na Figura 20 vêem-se as ARs presentes no disco solar neste dia. A AR analisada (NOAA 11476) encontra-se à esquerda da imagem. Na Figura 21, registro do SDO/AIA em 171 Å, a AR aparece mais evidenciada à esquerda (quadrado em preto).

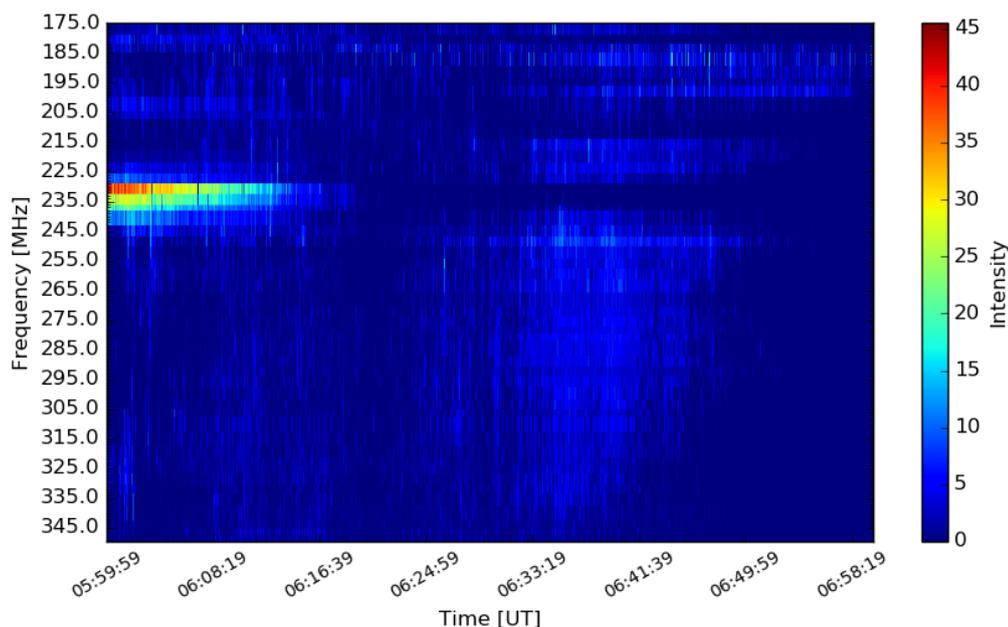
Tabela 10 - Sumário dos resultados obtidos na investigação da região ativa NOAA 11476, região esta que atravessou o disco solar entre os dias 5 e 16 de maio de 2012: área da mancha (em milionésimos da área do disco solar), número de manchas no dia, configuração da mancha solar (Mount Wilson), número de *flares* (*flare* mais intenso do dia), duração das tempestades.

Dia	Área da Mancha	Nº de Manchas	Configuração da Mancha Solar	Nº de Flares	Tempestades de Ruído
05	360	03	$\beta$		05:45 - 08:30 UT
06	760	03	$\beta\gamma$	3 M (M1.3); 17 C	
07	760	25	$\beta\gamma$	2 M (M1.3); 13 C	
08	810	25	$\beta\gamma\delta$	1 M (M1.4); 13 C	
09	940	33	$\beta\gamma\delta$	4 M (M4.7); 11 C	
10	1050	35	$\beta\gamma\delta$	2 M (M5.7); 16 C	10:00 - 17:30 UT
11	1040	50	$\beta\gamma\delta$	1 M (M1.7); 25 C	05:00 - 06:00 e 10:00 - 17:45 UT
12	1040	47	$\beta\gamma\delta$	27 C	05:00 - 16:15 UT
13	960	40	$\beta\gamma\delta$	10 C	08:00 - 10:00 UT
14	810	44	$\beta\gamma\delta$	07 C	05:00 - 06:30 e 17:00 - 17:30 UT
15	600	53	$\beta\gamma$	07 C	
16	260	12	$\beta$	04 C	04:45 - 05:15 e 14:45 - 17:45 UT

Fonte: <[http://bass2000.obspm.fr/search\\_struct.php?step=2](http://bass2000.obspm.fr/search_struct.php?step=2)>.

Figura 18 - Espectro dinâmico da RNS registrada pelo espectrógrafo CALLISTO-BLEN7M no dia 05 de maio de 2012 entre 06:00 e 07:00 UT.

05 May 2012 Radio flux density (BLEN7M)



A Figura 22 apresenta a RNS do dia 10/05/2012 (entre 13:00 e 14:00 UT), registrada pelo espectrógrafo CALLISTO-BLEN7M, os dados do satélite GOES para essa mesma data são apresentados

Figura 19 - Registros do satélite GOES 15 no dia 05 de maio de 2012 entre 05:45 e 07:00 UT.

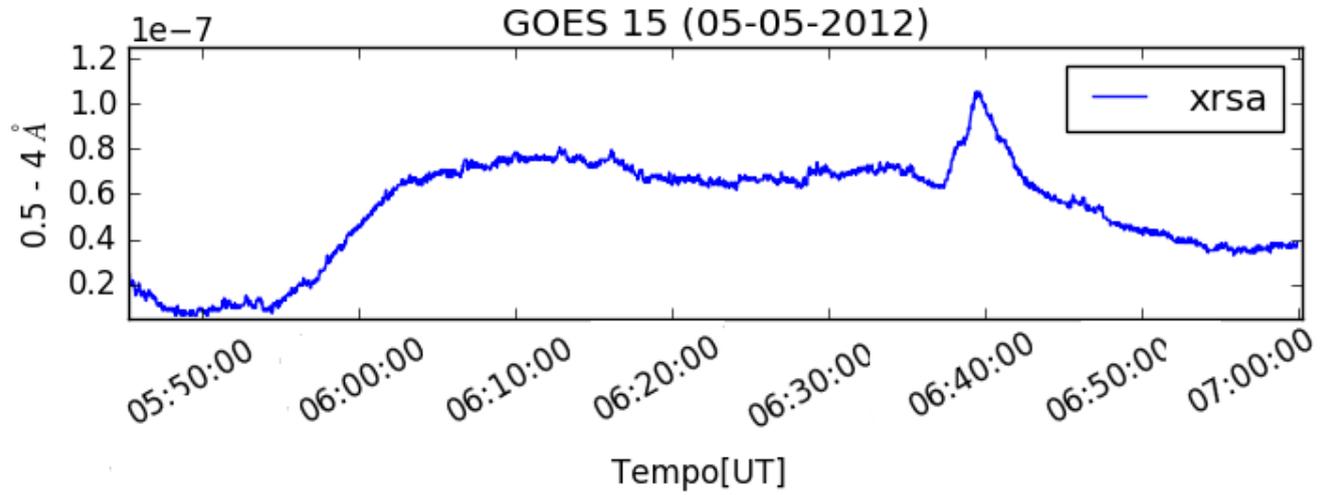
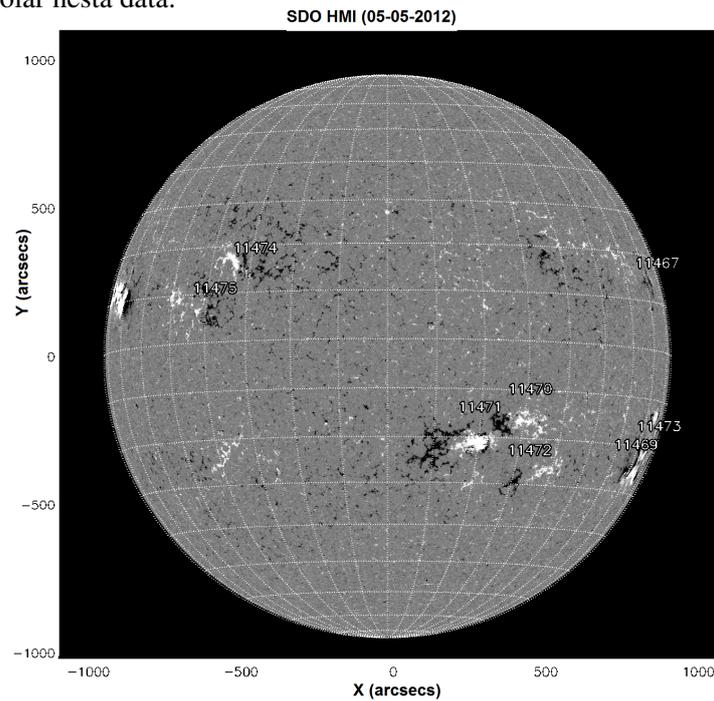


Figura 20 - Magnetograma registrado pelo SDO/HMI em 05/05/2012, mostrando as ARs presentes no disco solar nesta data.



na Figura 23, na Figura 24(a) vêm-se as ARs presentes no disco solar neste dia. A Figura 24(b) mostra o magnetograma da NOAA 11476 (positivo em branco e negativo em preto). A Figura 25(a), registro do SDO/AIA em  $171 \text{ \AA}$ , mostra as ARs presentes no disco solar e a Figura 25(b), a NOAA 11476 em detalhe, evidenciando sua complexidade.

Figura 21 - Registro do SDO/AIA em 171 Å, no dia 05/05/2012, mostrando as ARs presentes no disco solar nesta data. O quadrado em preto ressalta a NOAA 11476.

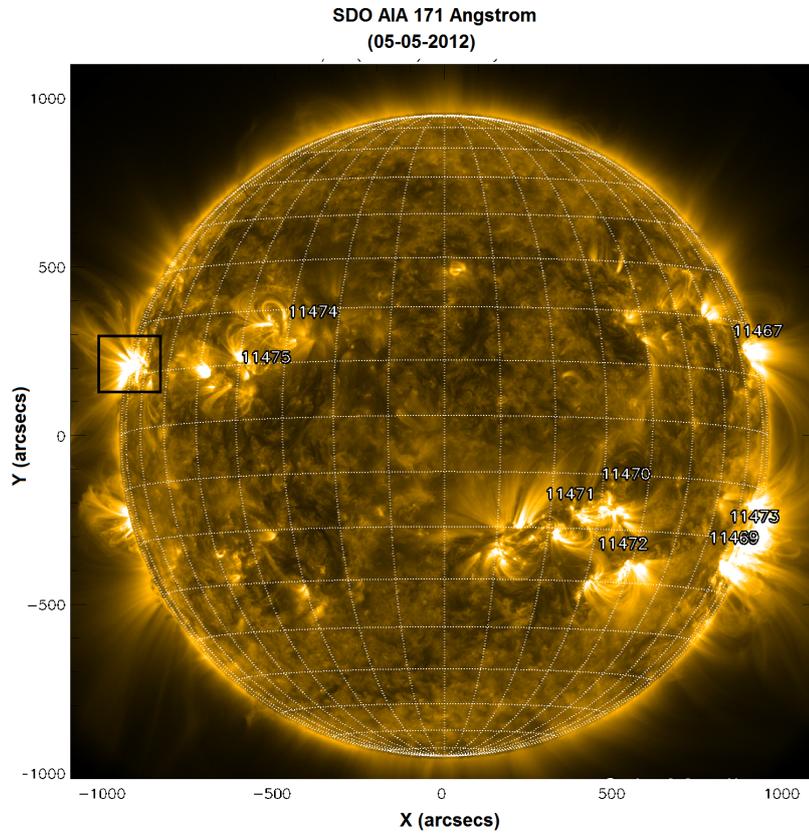


Figura 22 - Espectro dinâmico da RNS registrada pelo espectrógrafo CALLISTO-BLEN7M no dia 10 de maio de 2012 entre 13:00 e 14:00 UT.

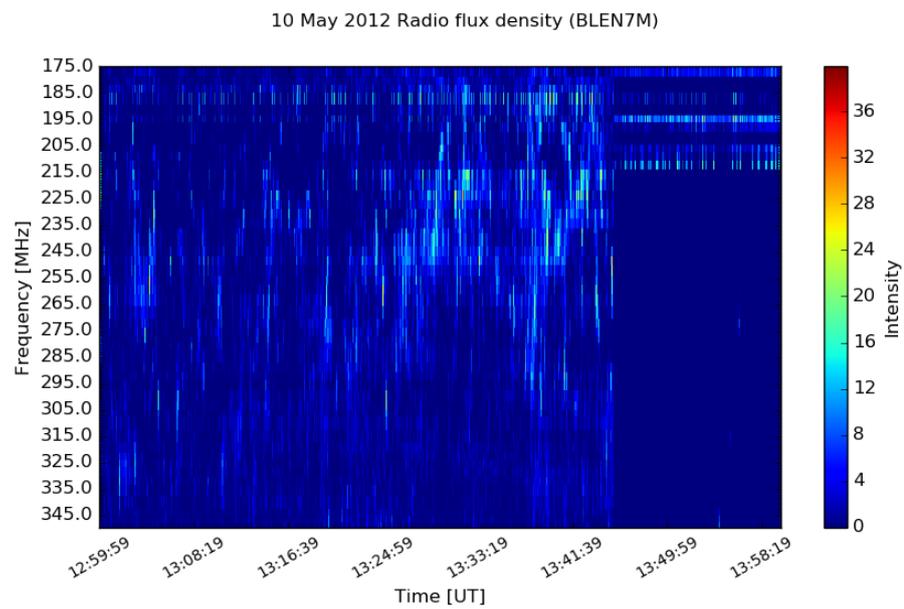


Figura 23 - Registros do satélite GOES 15 no dia 10 de maio de 2012 entre 13:00 e 14:00 UT.

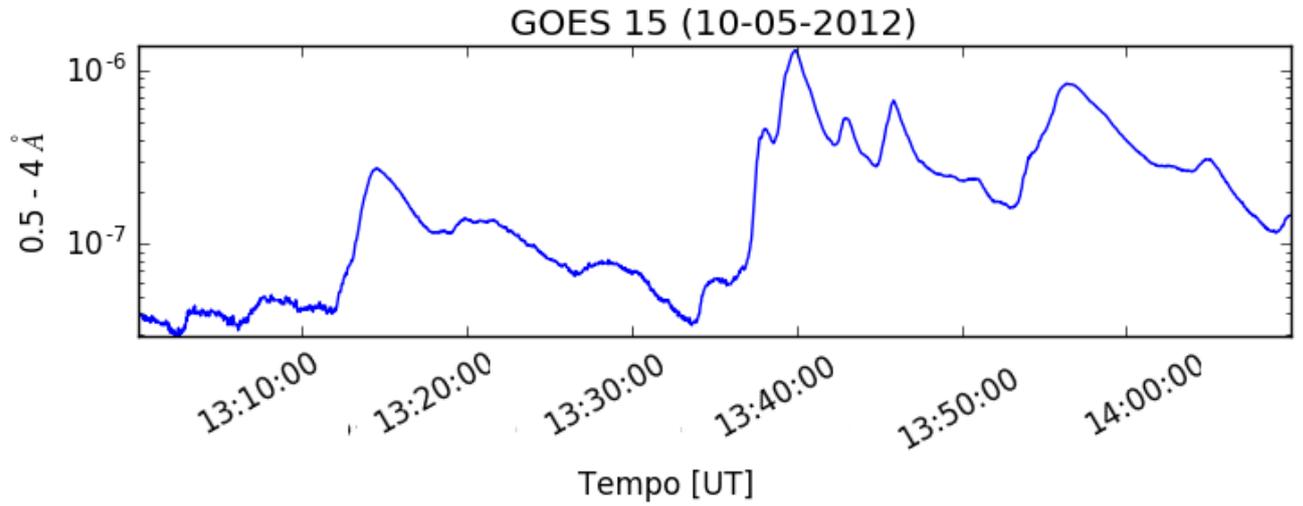
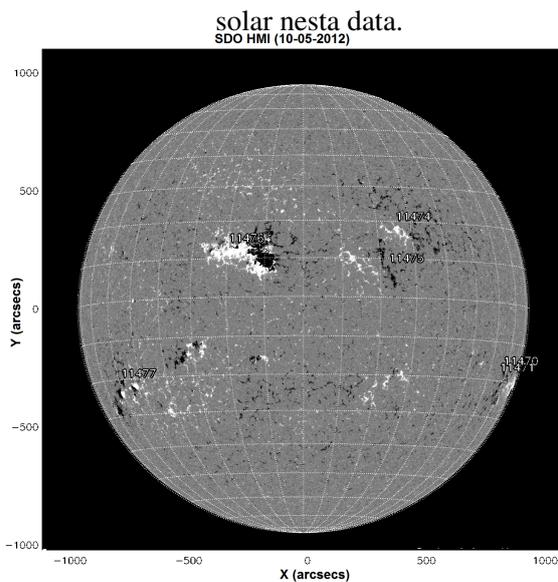


Figura 24 - Magnetogramas do disco solar e da AR 11476 em 10/05/2012 (SDO/HMI).

(a) Magnetograma registrado pelo SDO/HMI em 10/05/2012, mostrando as ARs presentes no disco



(b) Magnetograma da AR 11476, registrado pelo SDO/HMI em 10/05/2012.

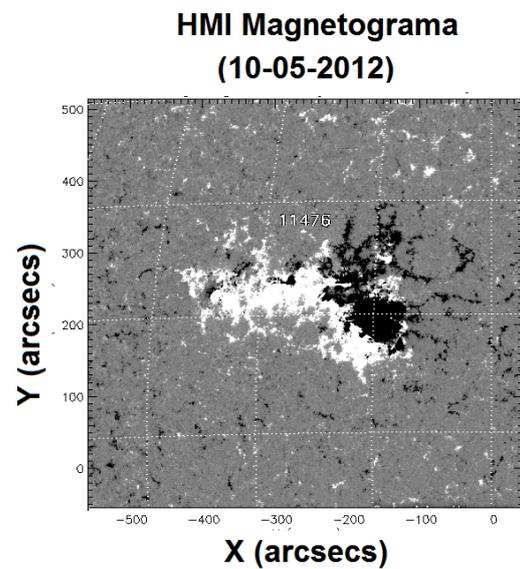
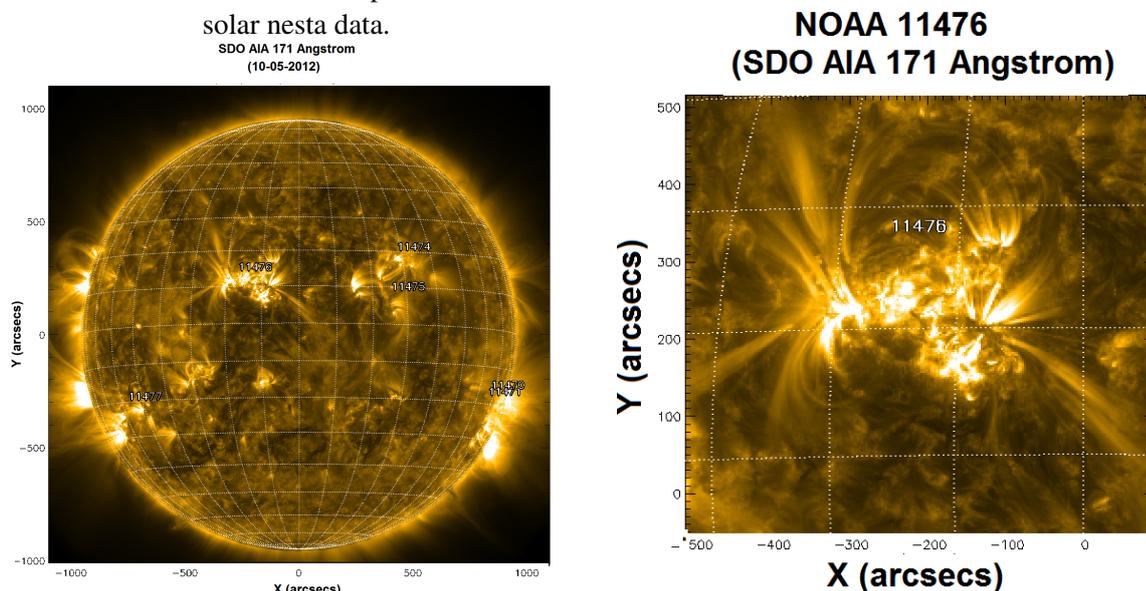


Figura 25 - Imagem do disco solar e da AR 11476, registradas pelo satélite SDO/AIA em  $171 \text{ \AA}$ , no dia 10/05/2012.

(a) Registro do SDO/AIA em  $171 \text{ \AA}$ , no dia 10/05/2012, mostrando as ARs presentes no disco solar nesta data. (b) Detalhe da AR 11476, registrada pelo SDO/AIA em 10/05/2012.



A Figura 26 apresenta a RNS do dia 16/05/2012 (entre 05:00 e 05:15 UT), registrada pelo espectrógrafo CALLISTO-BLEN7M. A Figura 27 apresenta a RNS do dia 16/05/2012 (entre 15:00 e 16:00 UT), os dados do satélite GOES para essa mesma data são apresentados na Figura 28, na Figura 29(a) vêem-se as ARs presentes no disco solar neste dia. A Figura 29(b) mostra o magnetograma da NOAA 11476 (positivo em branco e negativo em preto). A Figura 30(a), registro do SDO/AIA em  $171 \text{ \AA}$ , mostra as ARs presentes no disco solar e a Figura 30(b), a NOAA 11476 em detalhes.

Figura 26 - Espectro dinâmico da RNS registrada pelo espectrógrafo CALLISTO-BLEN7M no dia 16 de maio de 2012 entre 05:00 e 05:15 UT.

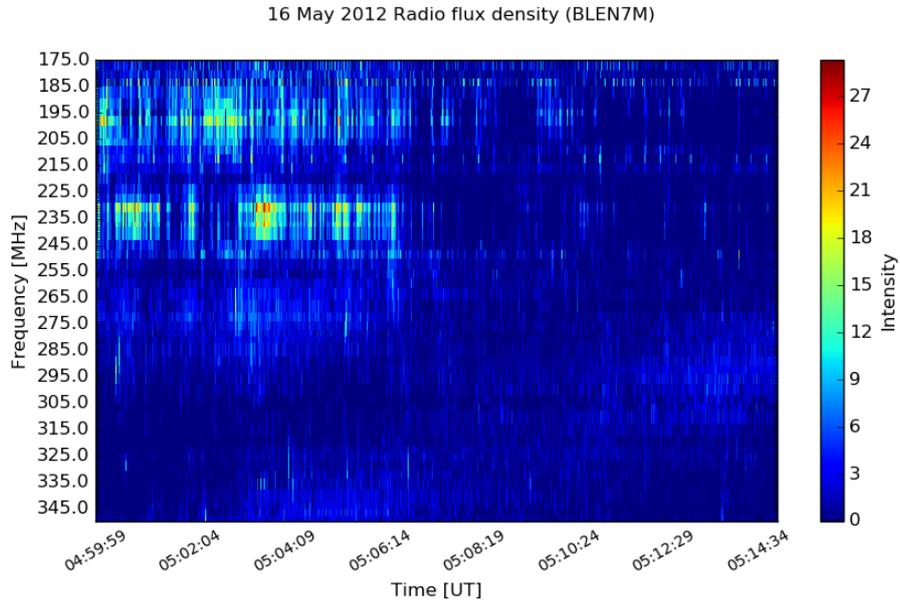


Figura 27 - Espectro dinâmico da RNS registrada pelo espectrógrafo CALLISTO-BLEN7M no dia 16 de maio de 2012 entre 15:00 e 16:00 UT.

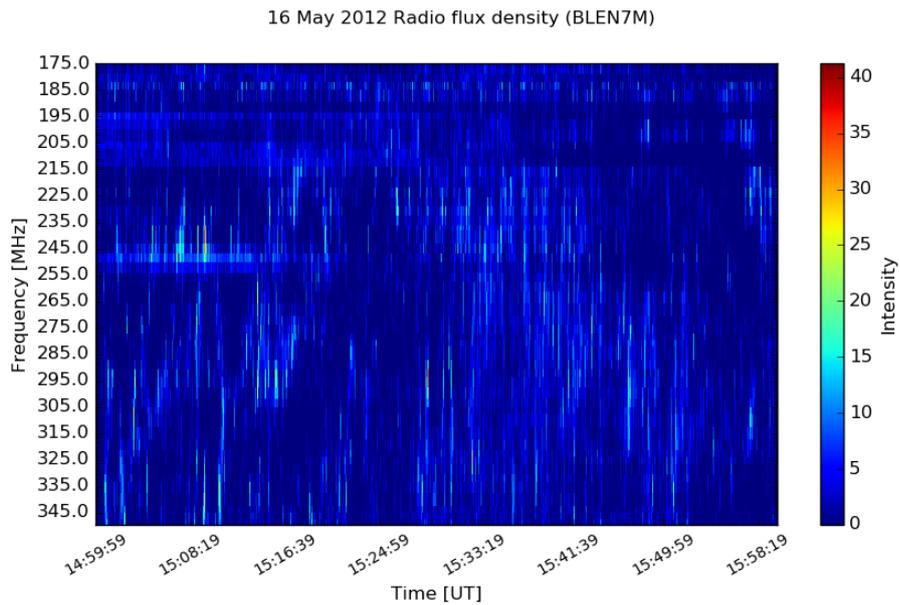


Figura 28 - Registros do satélite GOES 15 no dia 16 de maio de 2012 entre 05:00 e 16:00 UT.

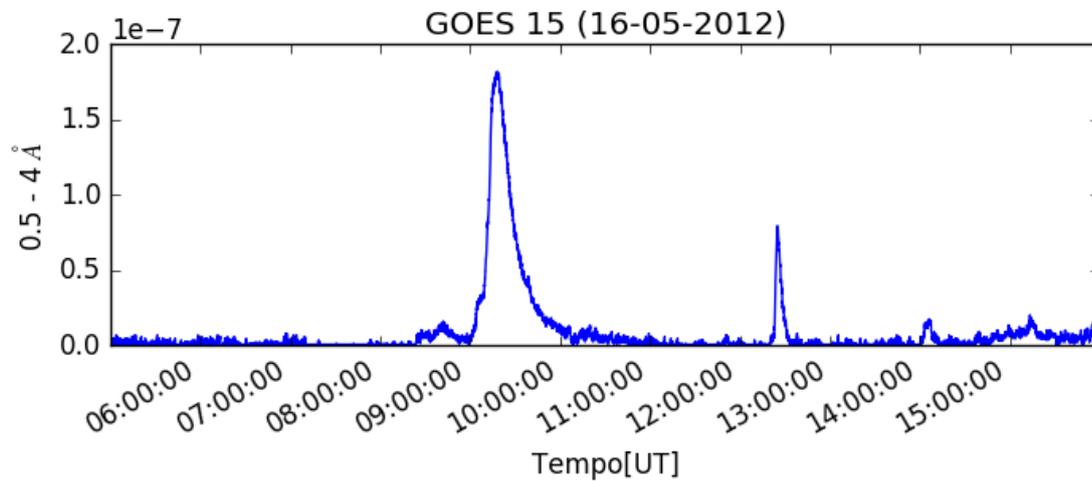
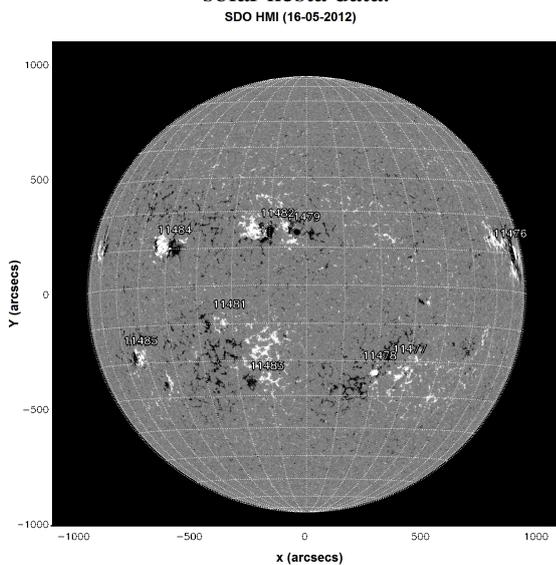


Figura 29 - Magnetogramas do disco solar e da AR 11476 em 16/05/2012 (SDO/HMI).

(a) Magnetograma registrado pelo SDO/HMI em 16/05/2012, mostrando as ARs presentes no disco solar nesta data.



(b) Magnetograma da AR 11476, registrado pelo SDO/HMI em 16/05/2012.

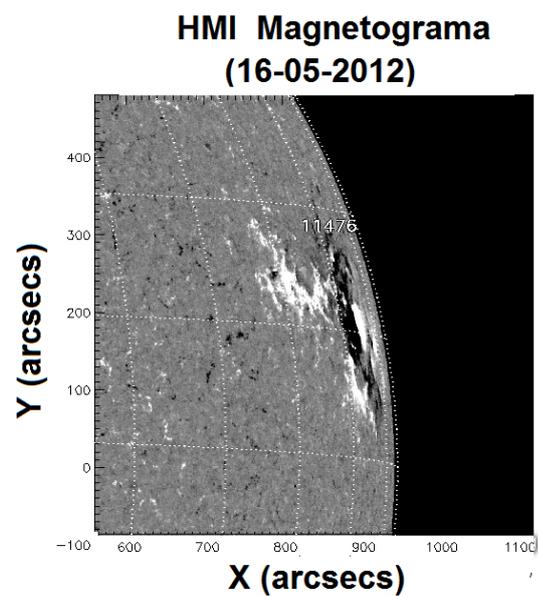
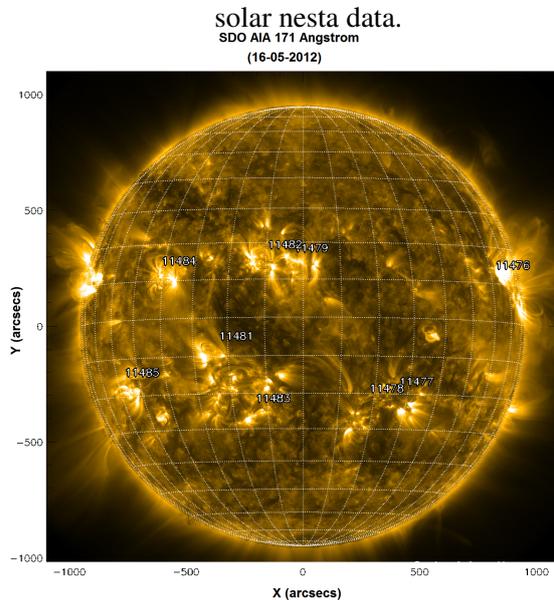
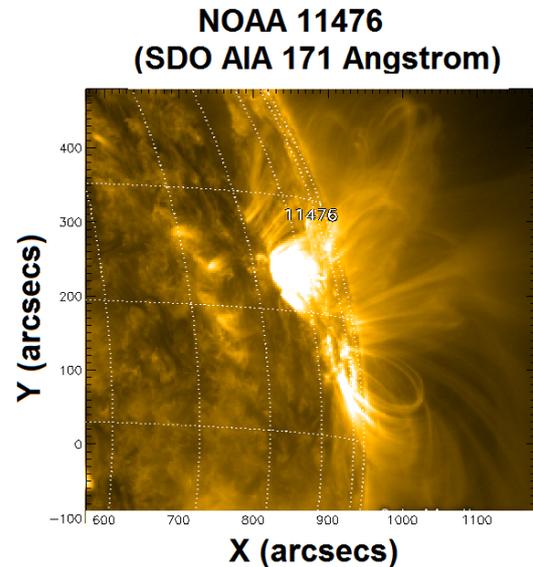


Figura 30 - Imagem do disco solar e da AR 11476, registradas pelo satélite SDO/AIA em 171 Å, no dia 16/05/2012.

(a) Registro do SDO/AIA em 171 Å, no dia 16/05/2012, mostrando as ARs presentes no disco



(b) Detalhe da AR 11476, registrada pelo SDO/AIA em 16/05/2012.



#### 4.4 Discussão

A tempestade registrada em 16/07/2012 ocorreu com a presença de 5 AR, todas com configuração magnética complexa ( $\beta\gamma\delta$ ), enquanto que a do dia 28/10/2012 contava com 4 AR, sendo duas com configuração magnética  $\beta\delta$  (outras duas com configuração magnética mais simples).

Quanto à área das AR, as que estavam presentes no dia da tempestade com a ocorrência de *flares* apresentavam uma área aproximadamente três vezes maior que as presente no dia sem a ocorrência de *flare* (960 e 330 graus ao quadrado, respectivamente).

Na faixa de frequência de ocorrência das tempestades (entre 150 e 350 MHz), o tempo de vida de elétrons não excede poucos décimos de segundos, o que é suficiente no caso dos *flares*. Já as tempestades necessitam que os elétrons sejam acelerados durante toda sua duração.

Como citado por Zanna et al. (2011), as tempestades estão associadas às AR, e essas, por sua vez, evoluem magneticamente no tempo, apresentando novas reconexões, portanto, sustentando a aceleração de elétrons e consequentemente a tempestade.

Assim, mesmo em dias sem a presença de *flares* intensos (somente classes A e B), mas com AR de configuração magnética complexa, podem-se observar tempestades de longa duração.

#### 4.5 Conclusões

- Levantamento estatístico:

Tempestades de ruído não estão relacionadas aos *flares*, mas sua fonte e a dos *flares* são as regiões ativas. Assim, encontrou-se que em dias com a presença de *flares* em raios-X há um maior número de tempestades (sete vezes mais, em média); nessa mesma análise foi encontrado que tempestades têm duração mais longa (em média, duas vezes e meia) quando da ocorrência de *flares*. Para que a tempestade seja sustentada é necessário que haja aceleração constante de elétrons não térmicos.

Pequenas alterações na configuração magnética das ARs parecem ser suficientes para gerar ondas de Langmuir, que são convertidas em ondas de rádio, e por fim, observadas como emissões tipo I. Assim, quando da ocorrência dos *flares*, essa energia liberada pelos mesmos pode ser somada à energia liberada pelas pequenas alterações, aumentando assim a duração das tempestades.

- **Evolução da AR e a ocorrência de RNS:**

O estudo apontou que um aumento na área da AR implica num aumento de sua complexidade magnética, e esse aumento na complexidade por sua vez aumenta a ocorrência de RNS. Do mesmo modo, com a diminuição da área da AR, registraram-se menos tempestades, ainda que na presença de Ar com complexidade magnética.

Regiões complexas produzem mais reconexões, e, como as tempestades de ruído são iniciadas por reconexões, havendo mais complexidade, mais reconexões tendem a acontecer e assim, mais tempestades de ruído. Em dias com baixa complexidade das AR ocorrem tempestades de ruído, embora menos intensas.

Assim, a complexidade magnética parece não influir tão diretamente na ocorrência ou não de tempestades, e sim sua evolução no tempo, o que causa novas reconexões, e essas por sua vez, sustentarem a aceleração dos elétrons, mantendo a tempestade.

## 5 PARÂMETROS OBSERVACIONAIS E FÍSICOS DE CORRENTES TIPO I EM DIAS COM E SEM *FLARE*

---

Os resultados do Capítulo anterior mostram que as RNS são registradas tanto em dias com e sem a presença de flares solares em raios-X. Assim, este Capítulo relata a análise dos parâmetros das correntes do tipo I associadas com duas RNS: uma na presença de flares solares em raios-X e uma registrada num dia sem a presença de um flare. As informações espectrais sobre as correntes nestes eventos foram obtidas a partir do espectrógrafo BLEN7M (cujas características foram detalhadas no Capítulo 3).

---

### 5.1 Introdução

Correntes do tipo I, cuja característica predominante é uma deriva em frequência, estão associadas às tempestades e esta deriva sugere o deslocamento da fonte através da coroa solar.

Neste estudo, foram identificados eventos de RNS em comprimento de onda métrico, utilizando dados da NOAA e dados do satélite GOES para verificar a ocorrência de *flares* solares em raios-X em dias com RNS no ano de 2011. Para analisar os parâmetros observacionais das tempestades, selecionou-se um dia com a ocorrência de *flare* (01/08/2011) e um dia sem *flare* (07/05/2011). As tempestades em questão representam as mais duradouras para todo o ano de 2011, 09h46min e 05h37min, para o dia com e sem *flare*, respectivamente. Como já citado no Capítulo 4, considerou-se dia sem *flare* os que apresentaram *flares* de classe A e B.

A identificação e seleção das correntes do tipo I associadas às tempestades foi baseada nos dados registrados pelo espectrógrafo CALLISTO-BLEN, localizado na Suíça, cujos dados são disponibilizados pela rede e-CALLISTO. Seguindo a metodologia descrita em Sodré et al. (2015), e detalhada a seguir, foram selecionadas 104 correntes no dia com *flare* (01/08/2011) e 72 no dia sem *flare* (07/05/2011).

Para cada corrente do tipo I foram determinados os parâmetros observacionais (largura de banda, duração e taxa de deriva em frequência), e inferidos os parâmetros físicos (velocidade radial, campo magnético e altura da fonte).

### 5.2 Metodologia

A seguir são descritos os procedimentos para obtenção dos parâmetros observacionais e físicos das correntes tipo I, analisados neste trabalho.

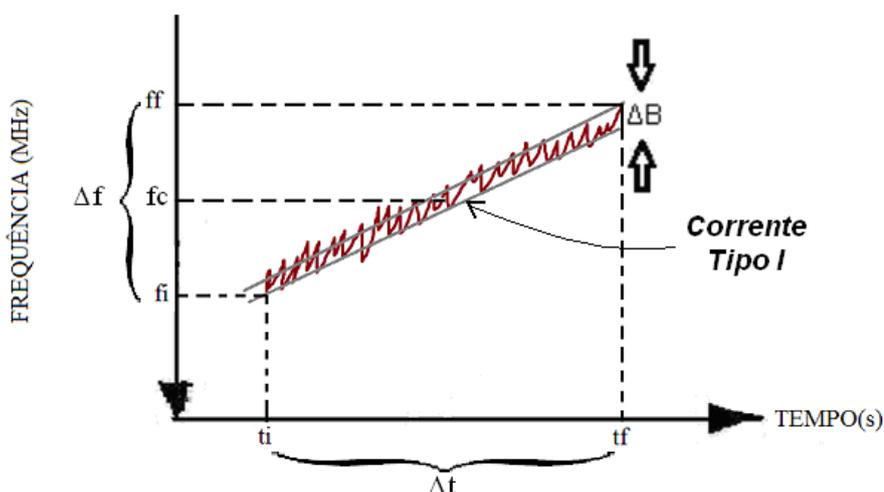
#### 5.2.1 Parâmetros Observacionais das Correntes Tipo I

A partir da visualização do espectro dinâmico de cada corrente tipo I, foram determinados os seguintes parâmetros observacionais, de acordo com o critério ilustrado na Figura 31:

- frequência inicial ( $f_i$ );
- frequência final ( $f_f$ );
- frequência central ( $f_c$ );
- largura de banda ( $\Delta B$ );
- instante de tempo inicial ( $t_i$ );

- instante de tempo final ( $t_f$ );
- duração total ( $\Delta t$ );
- intervalo total em frequência ( $\Delta f$ ) e
- taxa de deriva em frequência ( $\Delta f/\Delta t$ ).

Figura 31 - Espectro dinâmico esquematizado de uma corrente tipo I ilustrando a determinação dos parâmetros observacionais: instantes de tempo de início ( $t_i$ ) e de fim ( $t_f$ ), duração total da corrente ( $\Delta t$ ), frequências inicial ( $f_i$ ) e final ( $f_f$ ), frequência central ( $f_c$ ) e largura de banda em frequência ( $\Delta B$ ).



Como a determinação dos parâmetros espectro-temporais das correntes tipo I foi feita diretamente a partir dos registros em canal de frequência e tempo do espectro dinâmico, visualizado por meio do programa RAPP Viewer, o erro de cada medida de frequência foi tomado como sendo a metade do intervalo de frequência entre dois canais sucessivos (equivalendo a 31,25 MHz), e, da mesma forma, a metade do intervalo entre duas varreduras sucessivas para as medidas de tempo (0,625 ms). Assim, os erros associados à determinação das frequências e tempos dependem, respectivamente, das resoluções espectral e temporal das observações.

Como mostrado na Figura 31, a duração total ( $\Delta t$ ) para uma corrente tipo I foi determinada diretamente da diferença entre os instantes final ( $t_f$ ) e inicial ( $t_i$ ) medidos para cada espectro, ou seja,  $\Delta t = t_f - t_i$ .

Da mesma forma, o intervalo total em frequência ( $\Delta f$ ) foi determinado como sendo o maior intervalo de frequência entre a frequência inicial ( $f_i$ ) e a frequência final ( $f_f$ ), ou seja,  $\Delta f = f_f - f_i$ . A frequência central ( $f_c$ ) por sua vez é tomada como sendo a média aritmética entre as frequências inicial ( $f_i$ ) e final ( $f_f$ ). Assim:  $f_c = \frac{f_i + f_f}{2}$ .

Para a determinação da largura de banda em frequência ( $\Delta B$ ), o critério adotado foi o mesmo utilizado por De Groot et al. (1976). Como sugerido por esses autores, foi ajustada uma reta na parte superior e uma outra na inferior de cada corrente, abrangendo pelo menos 90% do evento.

A determinação das taxas de deriva em frequência de cada corrente tipo I foi obtida a partir do

ajuste linear entre os picos de emissão identificados nos extremos de cada corrente. Assim, a taxa de deriva em frequência foi obtida como a razão entre o intervalo total em frequência e a duração total ( $\frac{\Delta f}{\Delta t}$ ).

### 5.2.2 Parâmetros Físicos da Região Fonte das Correntes Tipo I

A partir da frequência de observação da emissão, em MHz, obtêm-se a densidade eletrônica (em  $\text{cm}^{-3}$ ) da região fonte ( $N$ ) pela equação (SARMA, 1994):

$$N = 1,24 \times 10^4 \times (f_p)^2, \quad (11)$$

sendo  $f_p$  a frequência de plasma, em MHz, assumida como a frequência central ( $f_c$ ) determinada para cada corrente tipo I.

O modelo de densidade de Newkirk, para a atmosfera solar superior relaciona a densidade eletrônica da região ( $N$ ) com a altura a partir da distância heliocêntrica ( $R$ ) pela relação (NEWKIRK, 1961):

$$N = 4,2 \times 10^4 \times 10^{4,32\left(\frac{R_s}{R}\right)}, \quad (12)$$

em que  $N$  é a densidade eletrônica,  $R_s$  é o raio solar ( $6,96 \times 10^5$  km) e  $R$  é a altura da fonte, dada em raios solares ( $R_s$ ).

Desta forma, a partir da densidade eletrônica da fonte emissora determinada pela Equação 1, a altura média da fonte de cada corrente tipo I foi estimada. Para tanto, foi adotado o modelo de Newkirk (NEWKIRK, 1961) multiplicado por um fator 2. A utilização deste fator 2, também adotada nas determinações de Hanasz (1966), Elgaroy e Uglan (1970), Sarma (1994), se justifica empiricamente pelo fato de que para a faixa de frequência característica das emissões tipo I em questão, esse modelo é o que melhor representa a variação da densidade eletrônica na região da fonte em função da altura na coroa solar para emissões na faixa de ondas métricas entre 50 e 500 MHz.

Outros modelos de densidade, como os propostos por Aschwanden (1995) e Melendez-Moreno (1997), são mais indicados para a faixa de frequências decimétricas (acima de 1 GHz). Por sua vez, o modelo de Alvarez (1973), apesar de propor uma relação entre a taxa de deriva e a frequência para a faixa de 75 kHz a 550 MHz, que engloba a faixa de frequência das emissões tipo I, apresenta uma resposta melhor para frequências inferiores a 1 MHz, pois foi ajustada com poucos dados em frequências acima de 200 MHz. Além disso, estes 3 modelos baseiam-se em determinações a partir de análises de rádio emissões tipo III.

Uma característica predominante na maioria das correntes tipo I é a presença de deriva em frequência, também verificada no presente trabalho. Neste caso, se a frequência de emissão é igual à frequência de plasma na fonte, a presença de uma deriva na frequência observada sugere um deslocamento da fonte emissora através da coroa solar.

Neste caso, a velocidade de deriva em frequência pode ser convertida em velocidade radial ( $v_r$ ) do agente excitador das correntes, dada em km/s, pela seguinte expressão (ELGARROY; UGLAND, 1970):

$$v_r = -\frac{3,5 \times 10^6}{(\ln f_c - 1,3)^2} \times \frac{1}{f_c} \times \frac{\Delta f}{\Delta t}, \quad (13)$$

sendo  $f_c$  a frequência central (em MHz) e  $\frac{\Delta f}{\Delta t}$  a taxa de deriva em frequência (em MHz/s) determinadas

para as correntes tipo I.

Baseado em análise de emissões tipo I obtidas por diversos trabalhos (WILD; TLAMICHA, 1964; ELGARROY; UGLAND, 1970; GROOT et al., 1976; AUBIER et al., 1978; KARLICKY; JIRICKA, 1981; AURASS et al., 1981; TLAMICHA et al., 1981), relacionando a intensidade do campo magnético e a altura da fonte de emissão tipo I correspondente ao nível de plasma relativo à frequência de plasma observada, Sarma (1994) obteve uma relação empírica para a relação entre o campo magnético e a distância radial da fonte das emissões tipo I. A relação pode ser escrita como (SARMA, 1994):

$$B = 41,26e^{(-2,56 \times \frac{R}{R_s})}, \quad (14)$$

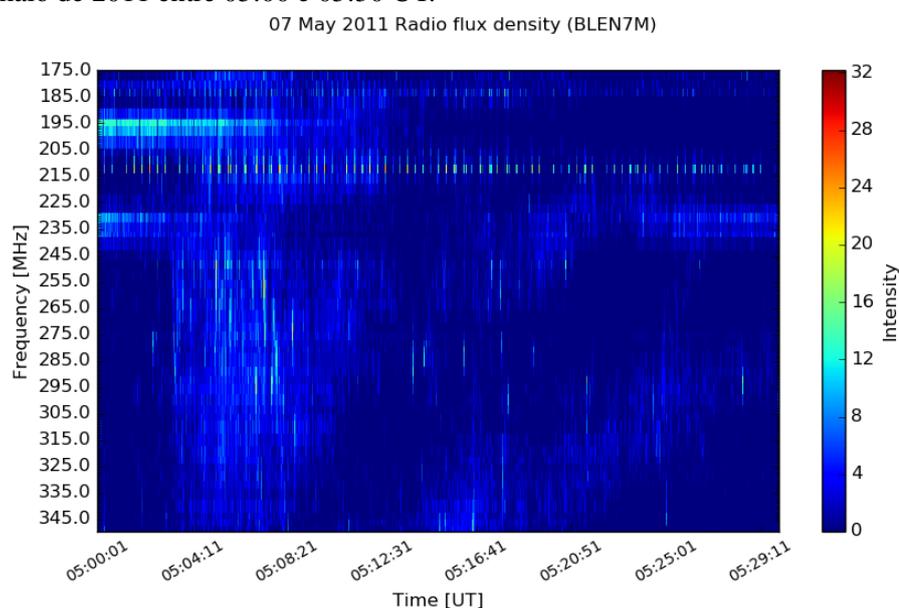
em que B é dado em Gauss e  $\frac{R}{R_s}$  é a altura na coroa solar expressa em unidades de raio solar.

Assim, a partir desta relação, considerando a altura da fonte ( $R$ ) estimada na equação 2), foi determinada a intensidade do campo magnético, na fonte, das correntes tipo I.

### 5.3 Resultados e Discussão

Um espectro dinâmico da RNS do dia 07/05/2011 (sem *flare*) é apresentado na Figura 32, e na Figura 33, os dados do GOES para este mesmo dia.

Figura 32 - Espectro dinâmico da RNS registrada pelo espectrógrafo CALLISTO-BLEN7M no dia 07 de maio de 2011 entre 05:00 e 05:30 UT.



A Figura 34 apresenta um espectro dinâmico da RNS do dia 01/08/2011 (com *flare*), e na Figura 35, os dados do GOES para este mesmo dia.

As correntes associadas às tempestades mais duradouras do ano de 2011 foram analisadas a partir do espectro dinâmico, os resultados encontrados são mostrados na Tabela 11 (parâmetros observacionais) e na Tabela 12 (parâmetros físicos).

A duração total ou tempo de vida de cada corrente ( $\Delta t$ ) foi medido como a diferença entre os

Figura 33 - Registros do satélite GOES 15 no dia 07 de maio de 2011 entre 00:00 e 06:00 UT.

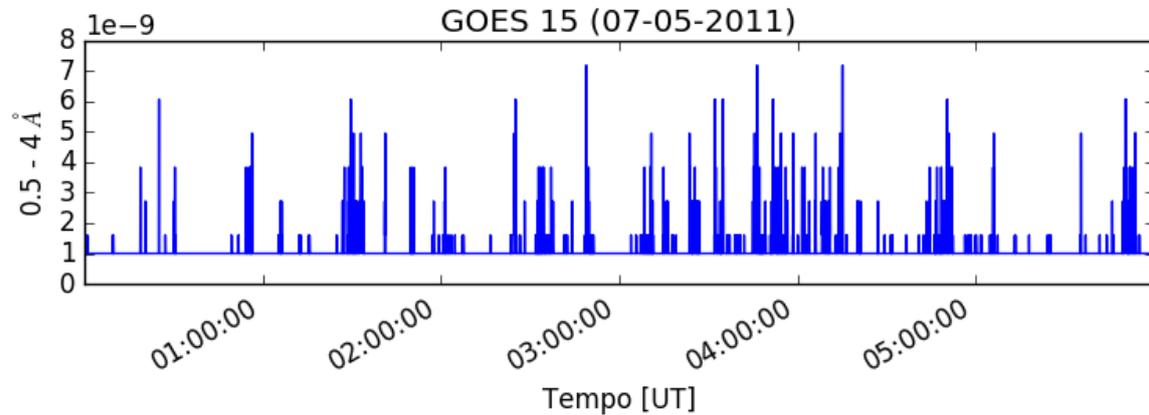
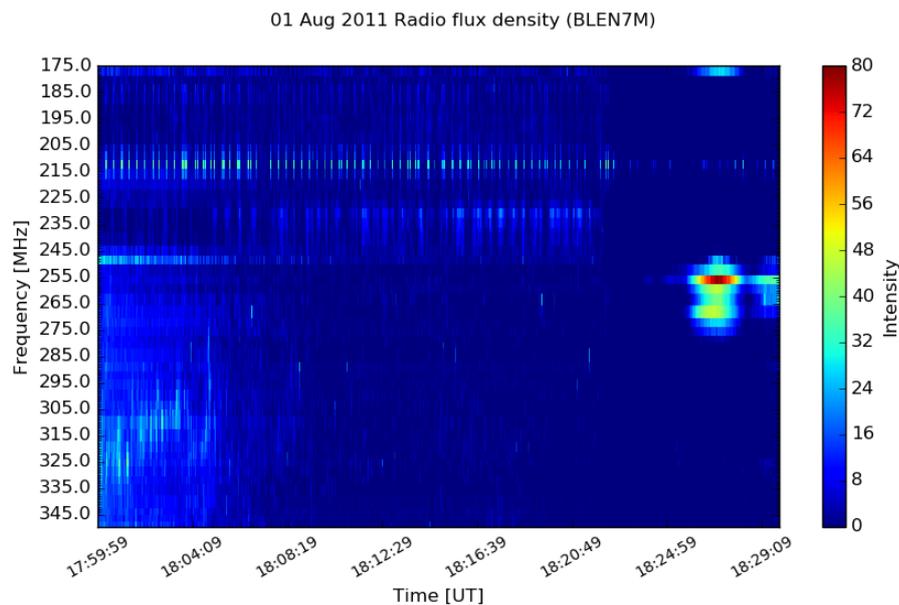


Figura 34 - Espectro dinâmico da RNS registrada pelo espectrógrafo CALLISTO-BLEN7M no dia 01 de agosto de 2011 entre 18:00 e 18:30 UT.



instantes de início e fim da emissão passíveis de identificação em relação ao *background*. As correntes apresentaram duração total entre  $\approx 7$  e 360 segundos para o dia sem *flare* e entre  $\approx 6$  e 200 segundos para o dia com a presença de *flares* (Figura 18a). Observa-se na Figura 36a que  $\approx 78\%$  das correntes do dia 01/08 apresentaram duração total abaixo de 60 segundos e no dia 07/05  $\approx 46\%$  das correntes apresentaram duração abaixo desse valor. Este resultado concorda com a afirmação de Elgaroy e Ugland (1970), de que as correntes de longa duração são menos frequentes do que as de curta duração, o que ficou evidenciado tanto na presença, quanto na ausência de *flares* nos dias de RNS.

A largura de banda ( $\Delta B$ ) foi determinada a partir da metodologia sugerida por Groot et al. (1976). Foram encontrados valores na faixa de  $\approx 6 - 90$  MHz (07/05/2011) e  $\approx 5 - 60$  MHz (01/08/2011).

Observa-se na Figura 36b que  $\approx 97\%$  das correntes encontra-se entre 15 e 45 MHz em dias de RNS com *flare* e no dia sem *flare*  $\approx 90\%$  das correntes se encontram nesta faixa.

Uma das principais características espectro-temporais das correntes tipo I é a deriva em frequên-

Figura 35 - Registros do satélite GOES 15 no dia 01 de agosto de 2011 entre 00:00 e 10:00 UT.

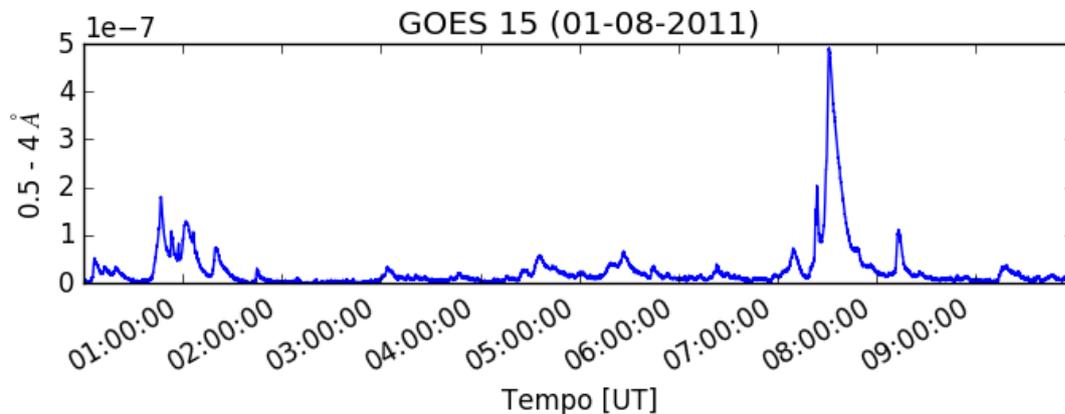


Tabela 11 - Parâmetros observacionais das correntes associadas à tempestade mais duradoura do ano de 2011, na presença e ausência de *flares* solares em raio-X. Na Tabela,  $\Delta t$  é a duração da corrente,  $\Delta B$  a largura de banda e  $\frac{\Delta f_c}{f_c \Delta t}$ , que aqui trataremos como  $\rho$  a deriva em frequência.

	<b>07/05/2011</b> <b>(sem flare)</b>	<b>01/08/2011</b> <b>(com flare)</b>
Número de Correntes	72	104
$\Delta t$ [s]	7 – 361	6 – 214
$\Delta B$ [MHz]	5,7 – 91	4,7 – 60
$\rho$ [MHz s <sup>-1</sup> ]	-5,2 – +2,5	-6,0 – +1,8

cia, com predominância da taxa negativa. A deriva sugere que os elétrons, responsáveis pelos *bursts* que compõem as correntes tipo I, quando acelerados podem fluir para cima ou para baixo na região de origem, bem como ser aprisionados num nível de frequência de plasma constante.

Das 72 correntes ocorridas em 07/05/2011,  $\approx 85\%$  encontram-se na faixa entre -1 e 1 MHzs<sup>-1</sup> e  $\approx 82\%$  das 104 correntes ocorridas em 01/08/2011 encontram-se nesta faixa (Figura 37a).

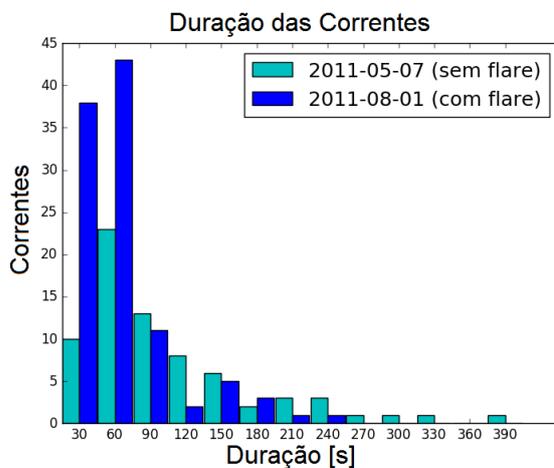
Levando em conta que a frequência de emissão é igual à frequência do plasma eletrônico na coroa solar, as taxas de deriva em frequência observadas foram convertidas em velocidade radial das fontes excitadoras das correntes tipo I. A distribuição do número de correntes com a velocidade radial é apresentada na Figura 37b, sendo que apenas as correntes com velocidade positiva estão ali representadas. Nota-se uma distribuição assimétrica, sendo que no dia sem a ocorrência de *flares* as velocidades variam de  $\approx -1960$  a  $\approx 3700$  kms<sup>-1</sup> e no dia da ocorrência de *flares* entre  $\approx -1150$  e  $\approx 3370$  kms<sup>-1</sup> (Tabela 12). Contudo, para o dia 07/05 a maior parte das correntes,  $\approx 64\%$  apresentou velocidades entre 200 e 1600 kms<sup>-1</sup>, enquanto que no dia 01/08,  $\approx 82\%$  têm velocidades nesta mesma faixa. Assim, o valor que melhor representa a distribuição é a mediana, que apresenta valores de 497 e 620 kms<sup>-1</sup> para os dias sem

Tabela 12 - Parâmetros físicos das correntes associadas à tempestade mais duradoura do ano de 2011, na presença e ausência de *flares* solares em raios-X. Na Tabela,  $v_r$  é a velocidade radial,  $v_r$  (mediana) a mediana da velocidade radial, B a intensidade do campo magnético e R é o raio em unidades de raios solares ( $R_s$ ) a partir da fotosfera.

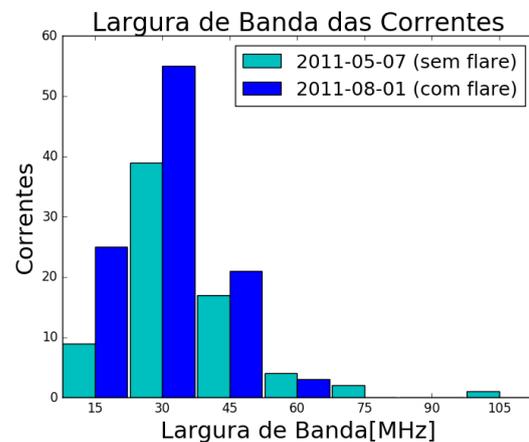
	07/05/2011 (sem flare)	01/08/2011 (com flare)
Número de Correntes	72	104
$v_r$ [km s <sup>-1</sup> ]	-1960 – 3700	-1150 – 3370
$v_r$ (mediana) [km s <sup>-1</sup> ]	497	620
B [G]	2,24 – 3,03	2,38 – 3,03
R [ $R_s$ ]	1,02 – 1,14	1,02 – 1,11

Figura 36 - Duração e Largura de banda

(a) Distribuição das correntes em função da duração.



(b) Distribuição das correntes em função da largura de banda.



a presença de *flares* e com a presença de *flares*, respectivamente.

A altura da fonte foi calculada utilizando o modelo de densidade de Newkirk (1961), multiplicado por um fator 2, que segundo Ramesh et al. (2010) é o fator mais representativo para as regiões ativas.

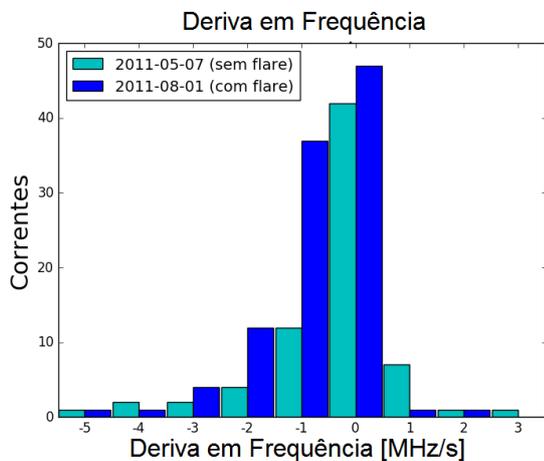
Os valores ficaram concentrados entre 1,02 e 1,08  $R_s$  ( $\approx 55\%$ ) para o dia sem *flare* (Figura 38a) e entre 1,02 e 1,08  $R_s$  ( $\approx 96\%$ ) para o dia com a presença de *flares* solares em raios-X.

A Figura 38b mostra a distribuição dos valores inferidos para o campo magnético. Na presença de *flare* (01/08/2011),  $\approx 81\%$  dos valores encontram-se na faixa entre 2,4 e 2,9 gauss, já sem a presença do *flare* (07/05/2011)  $\approx 92\%$  dos valores situam-se nesta faixa.

A Tabela 13 mostra os resultados encontrados para os parâmetros observacionais e físicos em termos percentuais, para os dias com e sem *flare*.

Figura 37 - Deriva em frequência e Velocidade Radial

(a) Distribuição das correntes em função da deriva em frequência.



(b) Distribuição das correntes em função da velocidade radial.

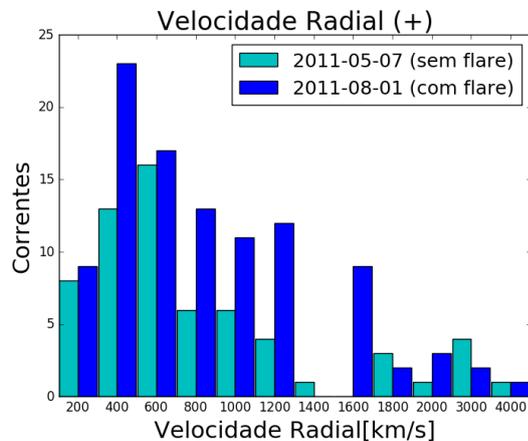
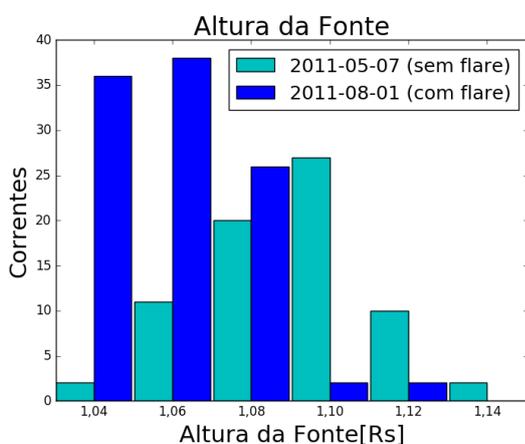
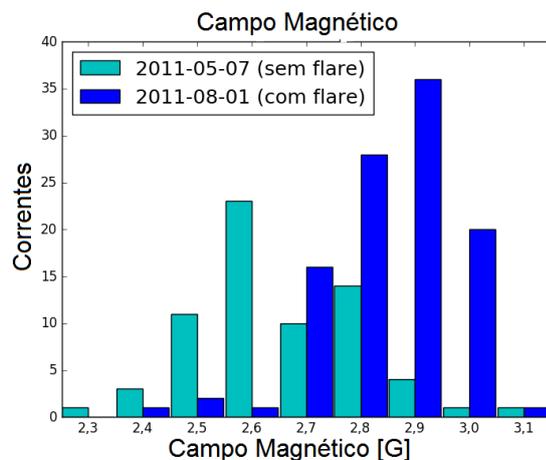


Figura 38 - Altura da Fonte e Campo Magnético

(a) Distribuição correntes em função da altura da fonte.



(b) Distribuição das correntes tipo I em função do Campo Magnético.



## 5.4 Conclusões

Não foram encontradas diferenças significativas na maioria dos parâmetros observacionais e físicos das RNS nos dias com e sem a ocorrência de *flares* solares em raios-X. As excessões ficaram por conta da duração, da velocidade radial e da altura da fonte.

No caso da duração, essa diferença pode estar relacionada com a menor disponibilidade de energia para acelerar os elétrons, já que não foram observados *flares* nesse dia, sendo que a aceleração de elétrons é condição para que a RNS seja sustentada.

A velocidade também pode ter sido afetada por essa mesma condição, já que está diretamente relacionada com a deriva em frequência, e, essa por sua vez, é dependente da razão entre o intervalo total em frequência e a duração total ( $\frac{\Delta f}{\Delta t}$ ) de cada corrente.

Para a discrepância nos valores percentuais da altura da fonte, os resultados podem ter sido alterados devido à utilização do modelo de densidade (modelo de Newkirk) multiplicado por um fator de 2, uma vez que trata-se de um modelo empírico, e amplamente aceito como o que melhor representa a

Tabela 13 - Parâmetros observacionais e físicos, em termos percentuais, das correntes associadas à tempestade mais duradoura do ano de 2011, na presença e ausência de *flares* solares em raio-X. Na Tabela,  $\Delta t$  é a duração da corrente,  $\Delta B$  a largura de banda,  $\frac{\Delta f_c}{f_c \Delta t}$ , que aqui trataremos como  $\rho$  a deriva em frequência,  $v_r$  é a velocidade radial,  $B$  a intensidade do campo magnético e  $R$  é o raio em unidades de raios solares ( $R_s$ ) a partir da fotosfera.

	<b>07/05/2011</b> <b>(sem <i>flare</i>)</b>	<b>01/08/2011</b> <b>(com <i>flare</i>)</b>
Número de Correntes	72	104
$\Delta t$ [s] (> 60)	46 %	78 %
$\Delta B$ [MHz] (15 – 45)	90 %	97 %
$\rho$ [MHz s <sup>-1</sup> ] (-1 – 1)	85 %	82 %
$v_r$ [km s <sup>-1</sup> ] (200 – 1600)	64 %	82 %
$B$ [G] (2,4 – 2,9)	92 %	81 %
$R$ [ $R_s$ ] (1,02 – 1,08)	55 %	96 %

variação da densidade eletrônica na região da fonte em função da altura na coroa solar para emissões na faixa de ondas métricas entre 50 e 500 MHz.

Esses resultados vêm corroborar com a afirmação de Zanna et al. (2011), sobre as tempestades não estarem associadas diretamente aos *flares*, já que a grande maioria dos parâmetros não apresentou diferenças em dias com e sem a presença dos *flares*.

## 6 REORGANIZAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO FOTOSFÉRICO

---

As RNS estão associadas às regiões ativas (AR), assim como os flares. Apesar disso, vimos nos Capítulos anteriores que as RNS não estão ligadas diretamente aos flares. Como a reorganização do campo magnético fotosférico pode ser importante na atividade dos flares, utilizou-se neste trabalho a análise da evolução temporal do espectro de potência magnético para identificar para quais escalas de comprimento a reorganização da AR ocorre. A partir de magnetogramas, e, considerando que a emissão tipo I é gerada pela emissão fundamental do plasma, a reorganização das escalas foi investigada como a possível responsável pelo processo de manutenção da RNS. Os resultados são descritos neste Capítulo.

---

### 6.1 Introdução

A aceleração de elétrons é o ponto inicial de todo o processo da RNS. Na coroa solar, a aceleração de partículas é responsável por diversos fenômenos observados como os *bursts* de rádio não térmicos, os *flares* e as *CMEs* (ASCHWANDEN, 2005), e acredita-se que essa aceleração seja devido à reconexão magnética e a choques.

A reconexão magnética pode ser vista como um processo pelo qual campos magnéticos sujeitos à pressão rearranjam sua topologia de modo a chegar a uma configuração de menor energia. O excesso de energia é parcialmente dissipado em partículas aceleradas. Do ponto de vista microscópico, o processo de reconexão envolve duas linhas de campo magnético diretamente opostas que se aproximam uma da outra e eventualmente mudam suas conectividades (SUBRAMANIAN, 2007).

Outro agente que é tipicamente invocado para aceleração de partículas é o choque. Um choque é formado quando um distúrbio de pressão/temperatura/densidade propaga-se através de um meio a velocidades muito maiores que a velocidade característica de propagação de pequenos distúrbios naquele meio. Para um meio não magnetizado, isto significa que os choques são tipicamente formados quando um distúrbio viaja a velocidades supersônicas. Em um meio magnetizado, a situação é um pouco mais complicada, pois existem as velocidades características a serem consideradas: a velocidade de Alfvén e as velocidades magnetosônicas lenta e rápida, por exemplo.

Assim como a reconexão, a aceleração por choque é um mecanismo que é aplicável a uma ampla variedade de fenômenos astrofísicos, sem mencionar várias características de observação em conexão com a coroa solar. No contexto das RNS, presume-se que os elétrons são acelerados por uma série de choques fracos, resultado da emergência de novos fluxos magnéticos na coroa a partir da fotosfera (SPICER et al., 1982). Fluxo magnético emergente também pode causar repetidos episódios de reconexão em pequena escala, que podem ser acompanhados por aceleração de elétrons (SUBRAMANIAN, 2007).

O agente de choque pode ser uma liberação de energia, como as de um *flare*, que causa o que é chamado de "onda de choque". O choque pode ser visto como uma descontinuidade propagante (em todas as quantidades físicas como a temperatura, densidade e pressão). Em geral existe alguma forma de turbulência presente no choque que permite que as partículas se difundam para frente e para trás através dele (SUBRAMANIAN, 2007).

Neste sentido, fluxos de plasma fotosférico, conhecidos por serem turbulentos, interagindo com campos magnéticos podem resultar em turbulência na atmosfera solar (SANTOS; WRASSE, 2016), e um caminho para investigar essa interação é estudando o espectro de potência de campos magnéticos

fotosféricos (ABRAMENKO et al., 2001); sendo que se o espectro de potência magnético mostrar uma tendência de diminuição para algumas faixas de número de ondas, pode-se assumir que uma cascata de energia ocorre por movimentos turbulentos (SANTOS; WRASSE, 2016; ABRAMENKO et al., 2001).

A fim de investigar as mudanças no espectro em tempos de *flares* para determinar se o campo magnético se reorganiza e para quais escalas de comprimento a reorganização é mais significativa, Santos e Wrasse (2016) analisaram quatro eventos ocorridos em 2012. Encontraram que as escalas de comprimento nas quais a reorganização é significativa representam a região de injeção de energia no espectro de potência magnético, e que, a dissipação ocorre em todas as escalas em regiões ativas bem desenvolvidas. Além disso, a evolução temporal do espectro de dissipação indicou que a potência aumentou para uma ampla faixa de número de ondas, inclusive pequenos número de ondas onde existe mais energia disponível.

A principal hipótese na teoria da turbulência é que a força motriz está presente apenas em grandes escalas. A energia adquirida pelos vórtices de pequena escala vem da quebra dos vórtices de grande escala e da cascata de energia cinética de grandes para pequenas escalas espaciais, mostrando um ambiente espectral proporcional a  $\kappa^{-\alpha}$ , sendo  $\alpha$  igual a  $\frac{5}{3}$  (SANTOS; WRASSE, 2016). Esse índice é conhecido como espectro de Kolmogorov (KOLMOGOROV, 1941).

Nas regiões ativas, o espectro de potência magnética é próximo do espectro de Kolmogorov, indicando que neste caso, a energia é transportada de pequenos para grandes números de ondas por fluxos de plasma fotosférico turbulentos (ABRAMENKO et al., 2001).

As RNS associadas às AR (ZANNA et al., 2011), e um mecanismo viável para sustentá-la pode ser a cascata de energia que ocorre por movimentos turbulentos, através da reorganização de campos magnéticos fotosféricos, e, segundo Mercier et al. (2015) o pouco conhecimento sobre a turbulência limita as teorias atuais com relação as RNS.

Os melhores meios para se investigar as circunstâncias sobre as quais acontecem as RNS são as regiões ativas quando essas não apresentam *flares* (BENTLEY et al., 2000), desse modo, investigou-se a evolução do espectro de potência de campos magnéticos fotosféricos de uma tempestade ocorrida em 12/08/2012 (entre 14:08 UT e 15:35 UT), sem a presença de *flares* e com a AR no centro do disco solar, aplicando a metodologia descrita a seguir.

## 6.2 Metodologia

A análise da reorganização do campo magnético fotosférico teve início com a seleção de um evento de RNS com as seguintes características:

- região ativa no centro do disco solar (evitando assim problemas de diretividade) e
- sem a presença de *flare* intenso (admitindo-se *flares* classes A e B).

Assim, chegou-se à RNS do dia 12/08/2012, registrada entre 14:08 e 15:35 UT (com pico às 14:18 UT), dois *flares* classe B (B8.9 e B1.8) e com região ativa no centro do disco solar (NOAA 11542). A Figura 39 mostra o espectro dinâmico da RNS, registrada pelo espectrógrafo CALLISTO-BLEN7M. Os *flares* gravados pelo satélite GOES 15 são mostrados na Figura 40. A Figura 41 apresenta imagens do instrumento AIA, em EUV (171 Å), onde à esquerda pode-se observar todo disco solar, sendo que o retângulo em branco demarca a região NOAA 11542. A Figura 41 à direita mostra os detalhes da AR 11542, evidenciando a complexidade da referida região ativa.

Seguindo a metodologia de Santos e Wrasse (2016), para o estudo do espectro de potência foram

Figura 39 - Espectro dinâmico da RNS registrada pelo espectrógrafo CALLISTO-BLEN7M no dia 12 de agosto de 2012 entre 14:08 e 15:35 UT.

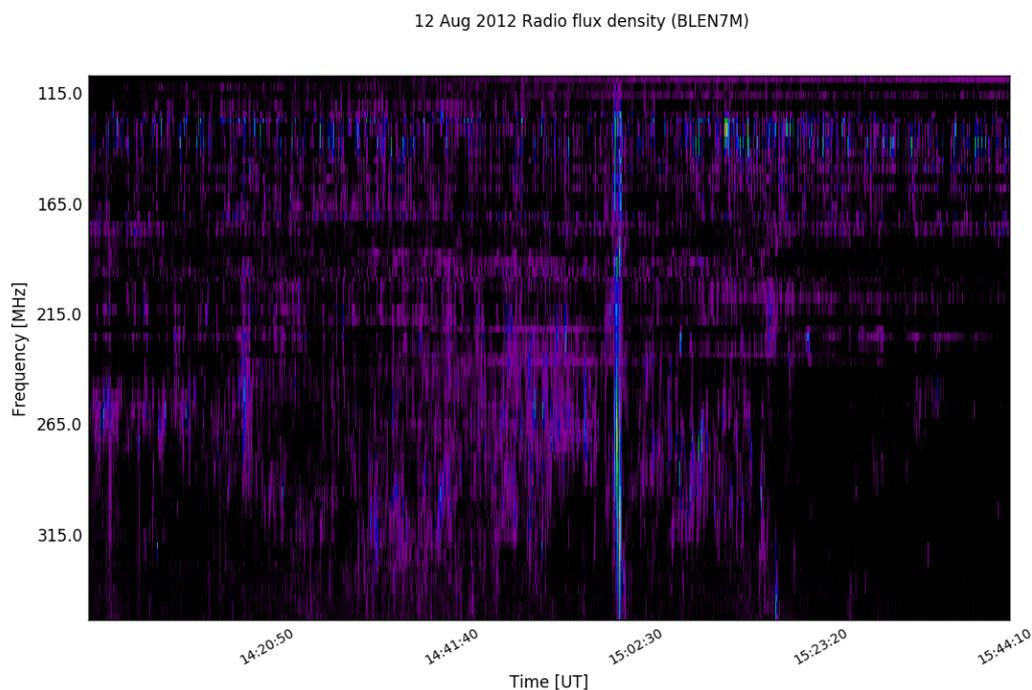
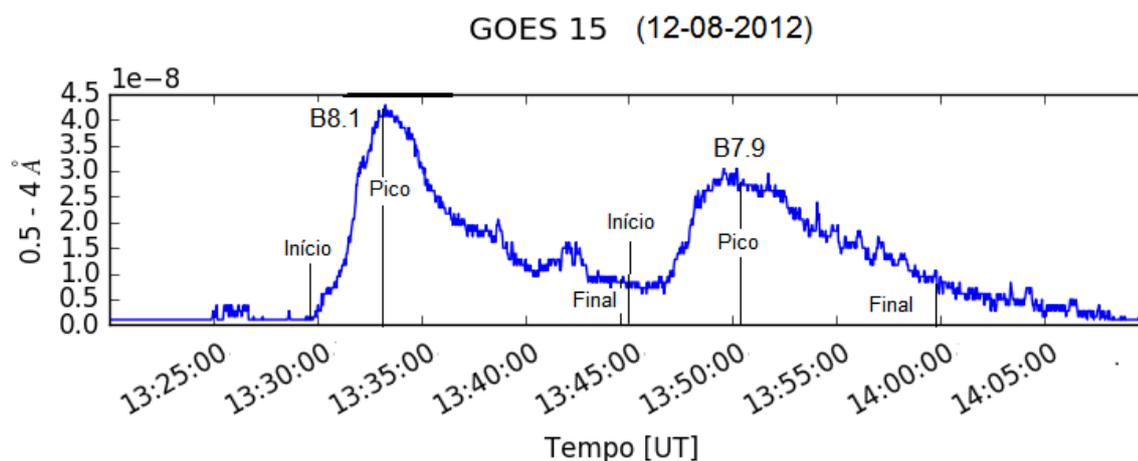


Figura 40 - Flares B8.1 (entre 13:28 e 13:44 UT) e B7.9 (entre 13:46 e 13:57 UT) registrados pelo satélite GOES 15 no dia 12/08/2012.



utilizados magnetogramas LOS (*line-of-sight*) registrados pelo instrumento HMI à bordo do SDO, cujas características estão detalhadas no Capítulo 3.

Foi feito um corte ao redor do centro da região ativa (no magnetograma), com dimensões de  $512 \times 512$  pixels (Figura 42). Os magnetogramas sofreram correção da rotação solar utilizando rotinas do pacote SSW ( $rot_x, y$ ); utilizando-os com uma cadência de 45 s.

À imagem da AR foi aplicada a transformada de Fourier (FFT), obtendo-se um espectro de energia 2D. A análise foi feita pela metodologia de Abramenko et al. (2001).

Figura 41 - (esquerda) Imagem do SDO/AIA (171Å) observada no dia 12 de agosto às 14:07:47 UT, antes do início da RNS. O retângulo branco destaca a AR 11542. (direita) Detalhes da AR 11542, evidenciando a complexidade da referida região ativa.

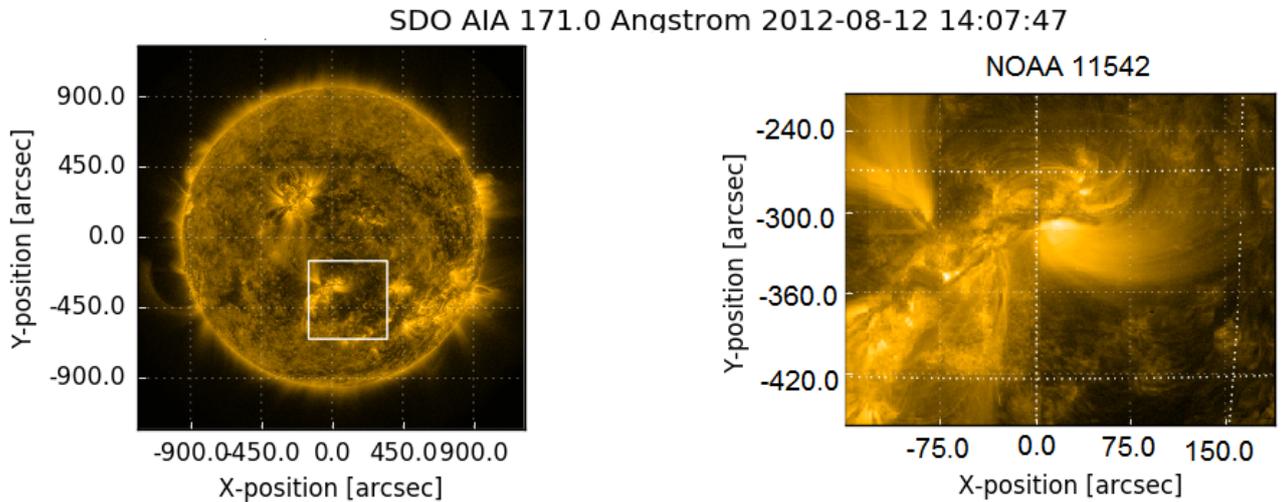
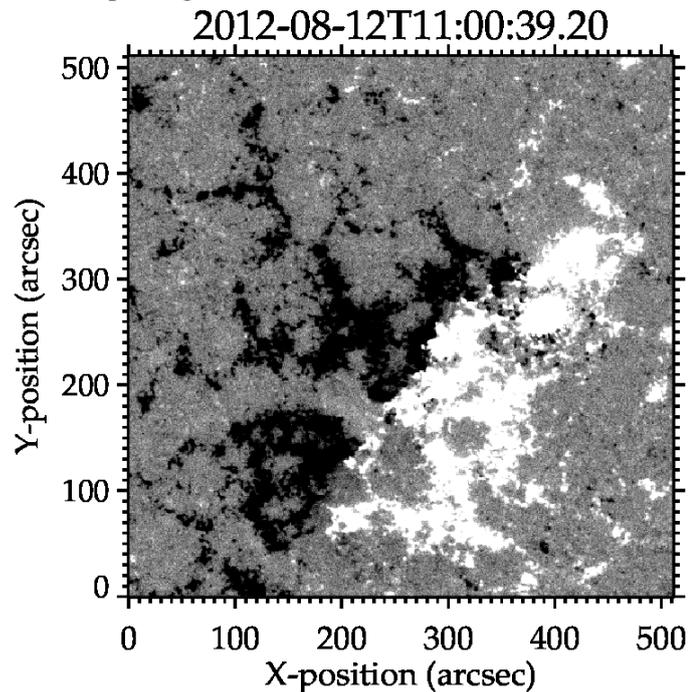


Figura 42 - Distribuição do campo magnético fotosférico da AR 11542, dia 12/08/2012 às 11:00:39 UT.



A partir do espectro de energia 2D é calculado o espectro de potência 1D (Figura 42) (SANTOS; WRASSE, 2016). Então é calculada a diferença entre o espectro inicial (em  $t = 0$ ), ou seja, o primeiro magnetograma da série temporal e o atual, até  $t = n$  (sendo  $n$  o número de magnetogramas da série), produzindo uma série temporal de diferenças nos espectros de potência (Figura 43).

Com base na evolução temporal do espectro de potência a partir do primeiro magnetograma, pode-se identificar onde e quando ocorrem mudanças no mesmo; mudanças essas que são interpretadas como reorganização do campo magnético.

O processamento desses dados foram feitos por C.M. Wrasse e J.C. Santos (novembro de 2016,

Figura 43 - Espectro de potência magnético (1D) da AR 11542. A linha vermelha representa a lei de potência com o ajuste do índice de potência calculado ( $\alpha$ ), já a linha pontilhada em preto, representa o ajuste da lei de potência com  $\alpha = \frac{5}{3}$ .

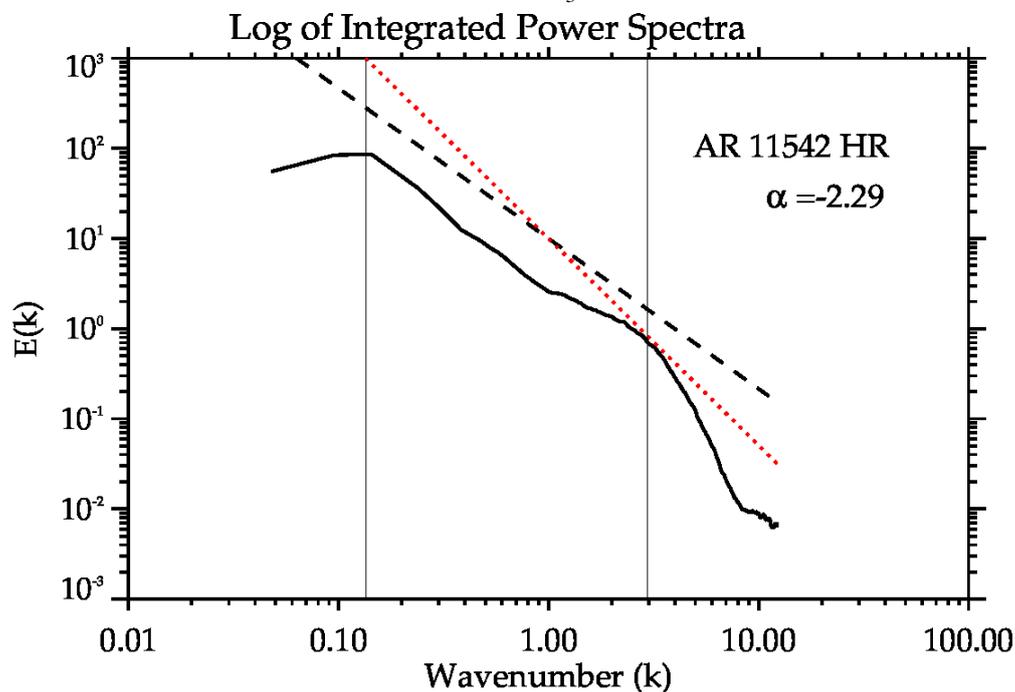
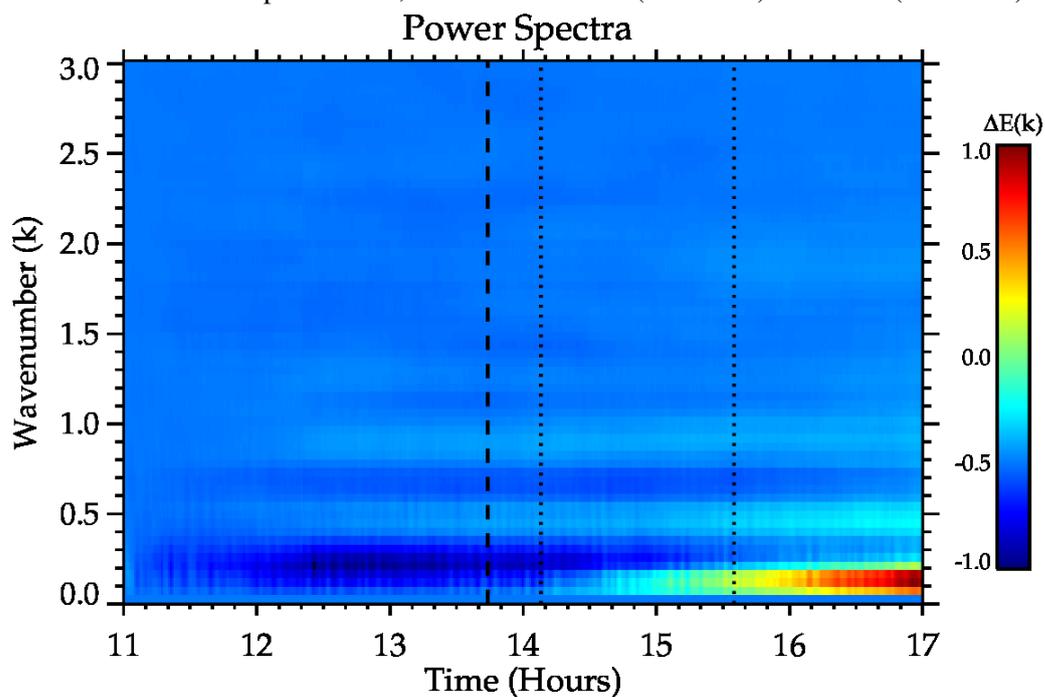


Figura 44 - Evolução temporal do espectro de potência (diferença de  $t = 0$ ) para a AR 11542. A barra colorida à direita dá a escala das mudanças de potência normalizadas. A linha vertical à esquerda, representa o horário do término de um flare e início do outro (ver Figura 19), e, as outras duas linhas pontilhadas, o horário de início (14:08 UT) e término (15:35 UT) da RNS.



comunicação pessoal). O detalhamento de todo o processo pode ser encontrado em Santos e Wrasse (2016).

### 6.3 Resultados e Discussão

A região ativa analisada (NOAA 11542) emergiu no dia 06/08/2012, com uma configuração magnética simples ( $\alpha$ ), com uma área de 20 graus quadrados, chegando no dia 09/08/2012 a 190 graus quadrados (com configuração magnética  $\beta$ ). A partir dessa data diminui sua área, até desaparecer do disco solar em 16/08/2012 (quando retornou a uma configuração magnética  $\alpha$ ), dados disponibilizados em <[http://bass2000.obspm.fr/search\\_struct.php?step=2](http://bass2000.obspm.fr/search_struct.php?step=2)> e <[http://bass2000.obspm.fr/get\\_time\\_evol.php?PHPSESSID=m5albphau19thqfvr0de7k46b5&numnoaa=1542](http://bass2000.obspm.fr/get_time_evol.php?PHPSESSID=m5albphau19thqfvr0de7k46b5&numnoaa=1542)>.

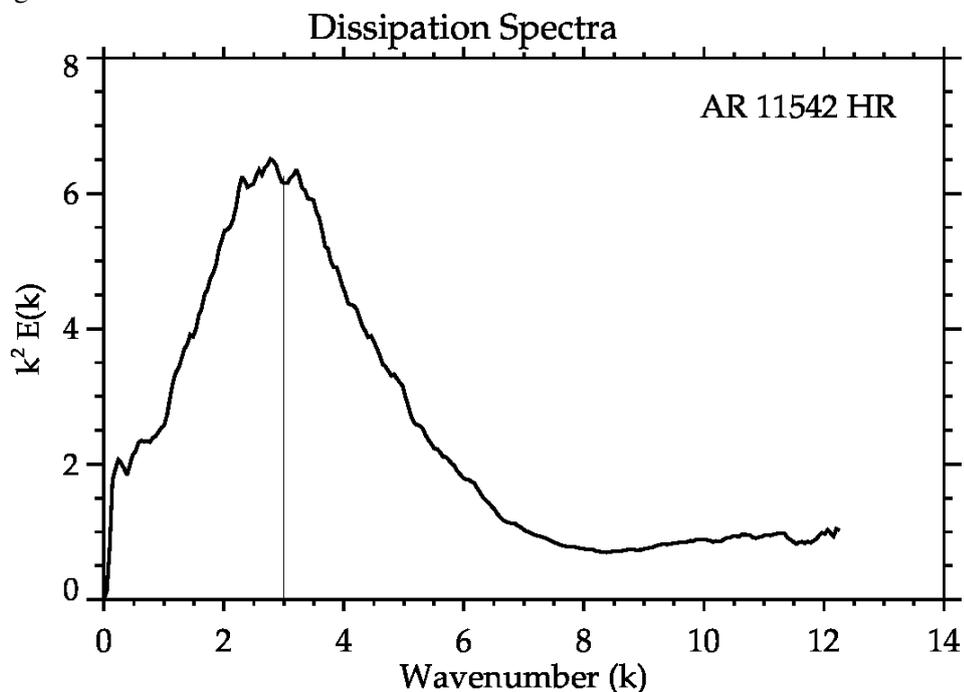
O espectro de potência inicial da região é apresentado na Figura 42; as linhas verticais indicam o intervalo entre  $\approx 0,12$  e  $3,0 \text{ Mm}^{-1}$ , no qual o espectro mostra um comportamento de lei de potência bastante similar e sua inclinação (o índice de potência) pode ser definida.

O espectro de potência magnético (1D) da região 11542, mostra que o  $\alpha$  encontrado foi  $-2,29$ , maior que  $-\frac{5}{3}$ , indicando a possibilidade de transferência de energia de pequenas para grandes estruturas. Além disso, o aumento do valor do índice da lei de potência provoca uma redistribuição da energia ao longo do espectro de potência.

Mudanças no espectro de potência são interpretadas como reorganização do campo magnético, neste caso, deu-se para números de onda menores que  $0,3 \text{ Mm}^{-1}$  ( $\approx 20,9 \text{ Mm}$ ). Portanto, a reorganização começa para valores  $\approx 0,03 R_s$  acima da fotosfera.

A análise foi feita com dados de magnetogramas de três horas antes do início da RNS, e até três horas após seu término.

Figura 45 - Espectro de dissipação  $\kappa^2 E(\kappa)$  em  $t = 0$ , calculado do espectro de energia da Figura 22 para a região ativa 11542.



Na Figura 43 vê-se que a reorganização começa logo após o início da RNS ( $\approx 10 \text{ min.}$ ), e continua mesmo após o término da mesma ( $\approx 1\text{h}30\text{min.}$ ), e ocorre principalmente para valores de  $\kappa$

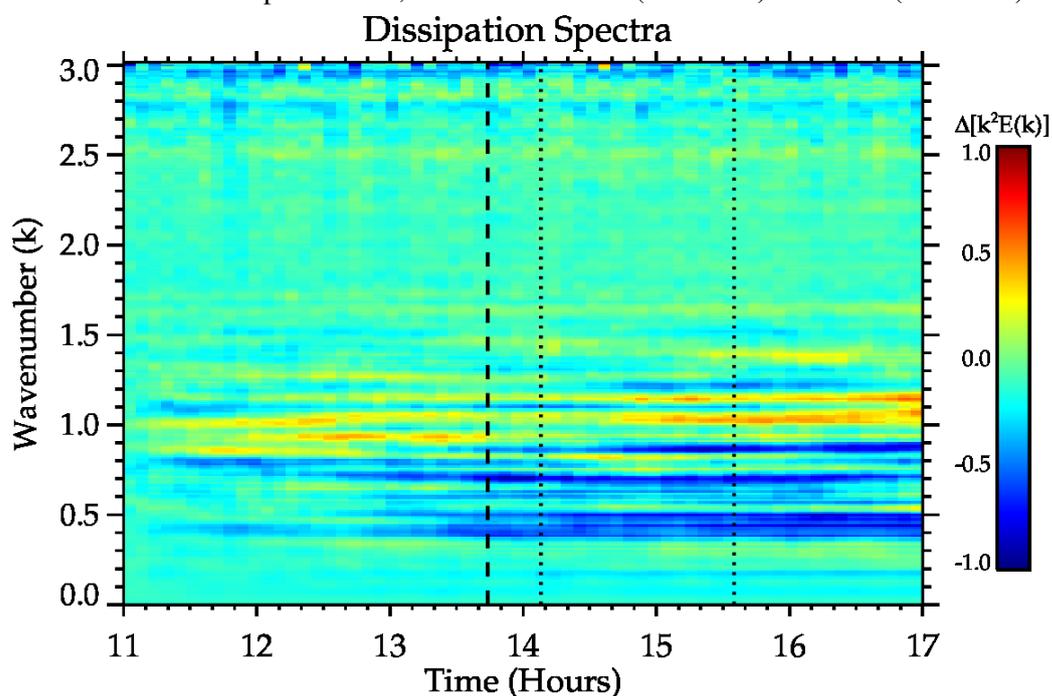
menores que  $0,2 \text{ Mm}^{-1}$ , associados a escalas de comprimento maiores do que  $\approx 31,4 \text{ Mm}$  ( $\approx 0,04 R_s$ ) acima da fotosfera.

A Figura 45 apresenta o espectro de dissipação, calculado do espectro de energia da Figura 43, e, mostra que a dissipação é significativa para números de onda menores que 3 Mm. A sobreposição do espectro de potência magnético e o espectro de dissipação ocorre num estado de turbulência subdesenvolvido (SANTOS; WRASSE, 2016), e, segundo Abramenko e Yurchyshyn (2010), quando campos magnéticos fotosféricos encontram-se neste estado, tanto a cascata de energia quanto a dissipação de energia em todas as escalas estão presentes no sistema.

A evolução temporal do espectro de dissipação (Figura 46) revela que a potência aumentou antes do início da RNS para uma ampla faixa de número de ondas, inclusive pequenos números de onda (grandes estruturas), indicando um aumento na dissipação em grandes escalas, onde mais energia está disponível.

Essa energia disponível que chega a alturas coronais, pode acelerar elétrons (iniciando uma RNS), e a disponibilidade de energia em grandes estruturas pode ser a responsável por manter a RNS.

Figura 46 - Evolução temporal do espectro de dissipação (diferença de  $t = 0$ ) para a AR 11542. A barra colorida à direita dá a escala das mudanças de potência normalizadas. A linha vertical à esquerda, representa o horário do término de um flare e início do outro (ver Figura 19), e, as outras duas linhas pontilhadas, o horário de início (14:08 UT) e término (15:35 UT) da RNS.



## 6.4 Conclusão

Um agente que é tipicamente invocado para a aceleração de partículas (ponto inicial de todo o processo das RNS) é o choque.

No choque, em geral, existe alguma forma de turbulência permitindo que as partículas se difundam através dele. Os fluxos de plasma fotosférico, são conhecidos por serem turbulentos, e, quando

interagindo com campos magnéticos podem resultar em turbulência na atmosfera.

Essa turbulência na atmosfera provoca uma cascata de energia, que chega a alturas coronais, e essa energia acelera elétrons, iniciando e mantendo a RNS, uma vez que a dissipação dessa energia perdura por todo tempo de ocorrência da tempestade.

O estudo da evolução do espectro de potência de campos magnéticos fotosféricos, através de sua reorganização mostrou:

- o espectro tem inclinação maior que  $\frac{5}{3}$ , indicando a possibilidade de transferência de energia de pequenas para grandes estruturas;
- o intervalo no qual o espectro mostra um comportamento de lei de potência bastante similar, e sua inclinação (o índice de potência), pode ser definido, entre  $\approx 0,12$  e  $3,0$  [ $\text{Mm}^{-1}$ ];
- o aumento do valor do índice da lei de potência provoca uma redistribuição da energia ao longo do espectro de potência;
- a reorganização começa para valores  $\approx 0,03 R_s$  acima da fotosfera;
- a reorganização começa logo após o início da RNS ( $\approx 10$  min.) e continua mesmo após o término da mesma ( $\approx 1\text{h}30\text{min.}$ );
- essa reorganização ocorre principalmente para valores de  $\kappa$  menores que  $0,2$  [ $\text{Mm}^{-1}$ ], associados a escalas de comprimento maiores do que  $\approx 31,4$  [ $\text{Mm}$ ] ( $\approx 0,04 R_s$ ) acima da fotosfera;
- a dissipação é significativa para números de onda menores que  $3$  [ $\text{Mm}^{-1}$ ];
- a análise da evolução temporal do espectro de dissipação mostrou um aumento antes do início da RNS e
- o aumento da dissipação abrange uma ampla faixa de número de ondas, inclusive pequenos números (grandes escalas), o que indica um aumento na dissipação em grandes escalas (onde há mais energia disponível).

À luz de todos esses resultados, postula-se que a energia disponível resultante da reorganização do campo magnético fotosférico, com a respectiva dissipação dessa energia através da cascata chegando a alturas coronais, pode indicar ser essa reorganização um dos agentes responsáveis por manter a aceleração dos elétrons durante as RNS.

## 7 CONCLUSÃO

O objetivo principal deste trabalho foi estudar as RNS: de onde vem a energia que mantêm os elétrons acelerados para que as mesmas tenham longa duração (a principal característica que as distinguem de outros tipos de emissão solar em ondas métricas). Para isso, dividiu-se o estudo em três etapas, onde na primeira estudou-se a possibilidade da evolução da AR estar associada a ocorrência de RNS, isso foi feito através da análise de uma tempestade registrada entre os dias 5 e 16 de maio de 2012; ainda nesta etapa foi realizado um levantamento estatístico (entre os anos de 2010 e 2015) sobre os dias de ocorrência de RNS na presença e na ausência de *flares* solares em raios-X, bem como a duração das RNS nestas condições. Na segunda etapa, foram analisados os parâmetros observacionais e físicos de correntes tipo I associadas à tempestade mais longa, para o ano de 2011, registrada em um dia sem a presença e um dia com a presença de *flares*, analisando 72 e 104 correntes, respectivamente, e finalmente, na terceira etapa, a reorganização do campo magnético fotosférico foi estudado como uma das prováveis fontes que alimentam uma tempestade de ruído em ondas de rádio no comprimento métrico (RNS). Não se constatou, na literatura, a existência de trabalhos com enfoque neste tipo de análise (o da terceira etapa), e para suprir essa lacuna foi desenvolvido esse estudo.

Na primeira etapa os resultados obtidos foram:

- No levantamento estatístico chegou-se às seguintes conclusões:

- tempestades de ruído não estão relacionadas aos *flares*, mas sua fonte e a dos *flares* são as regiões ativas;
- em dias com a presença de *flares* em raios-X há um maior número de tempestades (sete vezes mais, em média);
- nessa mesma análise foi encontrado que tempestades têm duração mais longa (em média, duas vezes e meia) quando da ocorrência de *flares*;
- pequenas alterações na configuração magnética das ARs parecem ser suficientes para gerar ondas de Langmuir, que são convertidas em ondas de rádio, e por fim, observadas como emissões tipo I e
- quando da ocorrência dos *flares*, essa energia liberada pelos mesmos pode ser somada à energia liberada pelas pequenas alterações, aumentando assim a duração das tempestades.

- Quanto à evolução da AR e a ocorrência de RNS:

- um aumento na área da AR implica num aumento de sua complexidade magnética;
- esse aumento na complexidade por sua vez aumenta a ocorrência de RNS;
- com a diminuição da área da AR, registraram-se menos tempestades, ainda que na presença de AR com complexidade magnética;
- regiões complexas produzem mais reconexões;
- tempestades de ruído são iniciadas por reconexões, portanto, havendo mais complexidade, mais reconexões tendem a acontecer e assim, mais tempestades de ruído e

- em dias com baixa complexidade das AR ocorrem tempestades de ruído, embora menos intensas.

Assim, a complexidade magnética parece não influir tão diretamente na ocorrência ou não de tempestades, e sim sua evolução no tempo, o que pode causar novas reconexões, e essas por sua vez, sustentarem a aceleração dos elétrons, mantendo a tempestade.

Na segunda etapa chegou-se às seguintes conclusões para cada um dos parâmetros analisados:

- **Duração:**

- as correntes apresentaram duração total entre  $\approx 7$  e 360 segundos para o dia sem *flare* e entre  $\approx 6$  e 200 segundos para o dia com a presença de *flares* e
- $\approx 78\%$  das correntes do dia 01/08 (com *flare*) apresentaram duração total abaixo de 60 segundos e no dia 07/05 (sem *flare*)  $\approx 46\%$  das correntes apresentaram duração abaixo desse valor.

- **Largura de banda:**

- foram encontrados valores na faixa de  $\approx 6 - 90$  MHz (07/05/2011) e  $\approx 5 - 60$  MHz (01/08/2011) e
- $\approx 97\%$  das correntes encontra-se entre 15 e 45 MHz em dias de RNS com *flare* e no dia sem *flare*  $\approx 90\%$  das correntes se encontram nesta faixa.

- **Deriva em frequência:** Das 72 correntes ocorridas em 07/05/2011,  $\approx 85\%$  encontram-se na faixa entre  $-1$  e  $1 \text{ MHzs}^{-1}$  e  $\approx 82\%$  das 104 correntes ocorridas em 01/08/2011 encontram-se nesta faixa.

- **Velocidade radial da fonte:**

- a distribuição é assimétrica;
- no dia sem a ocorrência de *flares* as velocidades variam de  $\approx 50$  a  $\approx 3700 \text{ kms}^{-1}$  e no dia da ocorrência de *flares* entre  $\approx 15$  e  $\approx 3300 \text{ kms}^{-1}$ ;
- para o dia 07/05 a maior parte das correntes,  $\approx 64\%$  apresentou velocidades entre 200 e  $1600 \text{ kms}^{-1}$ , enquanto que no dia 01/08,  $\approx 82\%$  têm velocidades nesta mesma faixa e
- o valor que melhor representa a distribuição é a mediana, que apresenta valores de 497 e  $620 \text{ kms}^{-1}$  para os dias sem a presença de *flares* e com a presença de *flares*, respectivamente.

- **Altura da fonte:** Os resultados para a altura da fonte ficaram concentrados entre  $1,02$  e  $1,08 R_s$  ( $\approx 55\%$ ) para o dia sem *flare*, e, entre  $1,02$  e  $1,08 R_s$  ( $\approx 96\%$ ) para o dia com a presença de *flares* solares em raios-X.

- **Campo Magnético:** Os valores inferidos para o campo magnético mostram que na presença de *flare* (01/08/2011),  $\approx 81\%$  dos valores encontram-se na faixa entre  $2,4$  e  $2,9$  gauss, já sem a presença do *flare* (07/05/2011)  $\approx 92\%$  dos valores situam-se nesta faixa.

A análise dos parâmetros mostrou que as tempestades não estão associadas diretamente aos *flares*, já que a grande maioria dos parâmetros não apresentou diferenças em dias com e sem a presença dos *flares*.

Por fim, na terceira etapa conclui-se que:

O estudo da evolução do espectro de potência de campos magnéticos fotosféricos, através de

sua reorganização mostrou:

- o espectro tem inclinação maior que  $\frac{5}{3}$  indicando a possibilidade de transferência de energia de pequenas para grandes estruturas;
- o intervalo no qual o espectro mostra um comportamento de lei de potência bastante similar e sua inclinação (o índice de potência) pode ser definida ficou entre  $\approx 0,12$  e  $3,0$  [ $\text{Mm}^{-1}$ ];
- o aumento do valor do índice da lei de potência provoca uma redistribuição da energia ao longo do espectro de potência;
- a reorganização começa para valores  $\approx 0,03 R_s$  acima da fotosfera;
- a reorganização começa logo após o início da RNS ( $\approx 10$  min.) e continua mesmo após o término da mesma ( $\approx 1\text{h}30\text{min.}$ );
- essa reorganização ocorre principalmente para valores de  $\kappa$  menores que  $0,2$  [ $\text{Mm}^{-1}$ ], associados a escalas de comprimento maiores do que  $\approx 31,4$  [ $\text{Mm}$ ] ( $\approx 0,04 R_s$ ) acima da fotosfera;
- a dissipação é significativa para números de onda menores que  $3$  [ $\text{Mm}^{-1}$ ];
- a análise da evolução temporal do espectro de dissipação mostrou um aumento antes do início da RNS e
- o aumento da dissipação abrange uma ampla faixa de número de ondas, inclusive pequenos números (grandes escalas), o que indica um aumento na dissipação em grandes escalas (onde há mais energia disponível).

À luz de todos esses resultados postula-se que a energia disponível resultante da reorganização do campo magnético fotosférico, com a respectiva dissipação dessa energia através da cascata, chegando a alturas coronais, pode indicar ser essa reorganização um dos agentes responsáveis por manter a aceleração dos elétrons durante as RNS.

As RNS vêm sendo estudadas ao longo de muito tempo, mas devido às limitações instrumentais e suas características complexas, ainda hoje não há uma explicação definitiva sobre sua associação com a aceleração de elétrons, sobre como as mudanças na configuração do campo magnético e nas regiões ativas contribui ou não para sua manutenção, assim, o ineditismo da metodologia aplicada neste estudo, contribui para a melhoria na compreensão da ocorrência e do mecanismo que as sustentam por horas ou mesmo dias.

## 7.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

O estudo apresentado na terceira etapa foi feito com uma tempestade com duração de  $1\text{h}27\text{min.}$ , contudo, sabe-se que as tempestades têm longa duração, chegando a ser registradas por dias, por isso, uma das possibilidades de estudo futuro é investigar uma tempestade (ou mesmo algumas), nessas condições.

Ampliar o estudo dos espectros de potência e dissipação para um intervalo de  $\pm 8$  horas ao redor da tempestade, uma vez que em Santos e Wrasse (2016), os autores encontraram mudanças no espectro magnético por volta de 8 horas em torno da ocorrência de *flares* (este trabalho utilizou  $\pm 3$  horas), aparece

também como um campo a ser explorado.

Outra possibilidade, já sugerida anteriormente, é fazer a extrapolação do campo magnético. Para isso, seriam utilizados os mesmos dados de magnetogramas usados no estudo do espectro magnético.

Uma comparação dos espectros para os dias de tempestade com e sem *flares* solares em raios-X, também poderia ser útil na melhor compreensão das emissões solares responsáveis pelas RNS.

## REFERÊNCIAS

- ABRAMENKO, V.; YURCHYSHYN, V. Magnetic energy spectra in solar active regions. **ApJ**, v. 720, p. 717–722, set. 2010. 41, 42, 80
- ABRAMENKO, V. et al. Magnetic power spectra derived from ground and space measurements of the solar magnetic fields. **Sol. Phys.**, v. 201, p. 225–240, jul. 2001. 41, 75, 76
- ALVAREZ, H.; HADDOCK, F. T. Wind density model from km-wave type III bursts. **Solar Physics**, v. 29, n. 1, p. 197–209, 1973.
- ASCHWANDEN, M. J. **Physics of the Solar Corona - an introduction with Problems and Solutions**. 2nd ed. Chichester, UK: Springer and Praxis, 2005. 18, 21, 30, 74
- ASCHWANDEN, M. J.; BENZ, A. O. Chromospheric evaporation and decimetric radio emission in solar flares. **Astrophysical Journal**, v. 438, n. 2, p. 997–1012, 1995.
- AUBIER, M. G.; LEBLANC, Y.; MOLLER-PEDERSEN, B. Type I and type III storm radiation: Summary of the observations and theoretical interpretation of the cut-off frequency. **Astron. Astrophys.**, v. 70, p. 685–693, 1978. 68
- AURASS, H.; BOEHME, A.; KARLICKY, M. Particle beams as a source of noise storm depression? **Sol. Phys.**, v. 130, p. 19–29, dez. 1990. 53
- AURASS, H. et al. The radio emission and active region development during the may 15-25, 1981 period. In: AL., O. E. et (Ed.). **Supplement to Solar Radio Storms**. Trieste, Italy, 1981. v. 1, p. 17. 68
- BABCOCK, H. W. The topology of the sun's magnetic field and the 22-year cycle. **ApJ**, v. 133, p. 572, mar. 1961. 26
- BAKKER, A. **Applied Computational Fluid Dynamics**. 2002.  
[Http://www.bakker.org/dartmouth06/engs150/09-kolm.pdf](http://www.bakker.org/dartmouth06/engs150/09-kolm.pdf). 39, 40
- BENTLEY, R. D.; FREELAND, S. L. Solarsoft - an analysis environment for solar physics. In: **Crossroads for European Solar and Heliospheric Physics. Recent Achievements and Future Mission Possibilities**. [S.l.: s.n.], 1998. (ESA Special Publication, v. 417), p. 225. 51
- BENTLEY, R. D. et al. Magnetic activity associated with radio noise storms. **Sol. Phys.**, v. 193, p. 227–245, abr. 2000. 37, 53, 75
- BENZ, A. O. Radio astronomical diagnostics. **Lecture Notes in Physics**, v. 468, p. 213, 1996. 22
- \_\_\_\_\_. Flare observations. **Living Reviews in Solar Physics**, v. 5, n. 1, p. 1, feb 2008. 23, 29
- BENZ, A. O. et al. Survey on solar x-ray flares and associated coherent radio emissions. **Sol. Phys.**, v. 226, p. 121–142, jan. 2005. 43, 53
- \_\_\_\_\_. A world-wide net of solar radio spectrometers: e-callisto. **Earth Moon Planet**, v. 104, p. 277–285, 2009. 21, 23, 33, 44
- BENZ, A. O.; WENTZEL, D. G. Solar type I radio bursts: An ionacoustic wave model. **International Astronomical Union**, v. 86, p. 251–254, 1980. 37
- \_\_\_\_\_. Coronal evolution and solar type I radio bursts: An ion-acoustic wave model. **Astron. Astrophys.**, v. 94, p. 100–108, 1981. 37

BISKAMP, D.; SCHWARZ, E.; DRAKE, J. F. Two-dimensional electron magnetohydrodynamic turbulence. **Phys. Rev. Lett.**, American Physical Society, v. 76, p. 1264–1267, Feb 1996. Disponível em: <<http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.76.1264>>. 41

BOUVIER, A.; WADHWA, M. The age of the solar system redefined by the oldest pb-pb age of a meteoritic inclusion. **Nature Geoscience**, v. 3, p. 637–641, set. 2010. 18

CECATTO, J. R. **O Sol**. São José dos Campos: INPE-7177-PUD/38, 2003. 25

CHARBONNEAU, P. Dynamo models of the solar cycle. **Living Reviews in Solar Physics**, v. 7, set. 2010. 26

CHEN, F. F. **Introduction to plasma physics and controlled fusion**. 2. ed. New York: Plenum Press, 1983. v. 1: Plasma Physics. 31

COSTAJR, E. et al. Ondas de alfvén no meio interplanetário. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 33, n. 2, p. 1–8, 2011. 31

DULK, G. A. Radio emission from the sun and stars. **Ann. Rev. Astron. Astrophys.**, v. 23, p. 169–224, 1985. 31

DUTRA, J. A. S. S. **Estruturas Finas Tipo U e J Presentes na Rádio Emissão Solar em Ondas Decimétricas**. Dissertação (mestrado) — Universidade do Vale do Paraíba-UNIVAP, 2010. 31

ELGARROY, O. Highresolution spectrometry of enhanced solar radio emission. **Astrophysica Norvegica**, VII, n. 5, p. 123–261, 1961. 31, 34, 36

ELGARROY, O.; UGLAND, O. Characteristic properties of small chains of type I solar radio bursts. **Astron. & Astrophys.**, v. 5, p. 372–381, 1970. 35, 67, 68, 69

FAN, Y. Magnetic fields in the solar convection zone. **Living Reviews in Solar Physics**, v. 6, dez. 2009. 27

FERNANDES, F. et al. Decimetric fine structures as signatures of plasma emission mechanism and magnetic morphology of flaring loops. In: **37th COSPAR Scientific Assembly**. [S.l.: s.n.], 2008. (COSPAR Meeting, v. 37), p. 869. 21

FERNANDES, F. C. R. et al. Decimetric fine structures and associated x-ray flares. In: Paillé, J.-P. (Ed.). **35th COSPAR Scientific Assembly**. [S.l.: s.n.], 2004. (COSPAR Meeting, v. 35), p. 2984. 21

\_\_\_\_\_. Investigations of the acceleration region of energetic electrons associated with decimetric type iii and x-ray bursts. **Advances in Space Research**, v. 25, p. 1813–1816, 2000. 23

GARY, G. A. Plasma beta above a solar active region: Rethinking the paradigm. **Sol. Phys.**, v. 203, p. 71–86, out. 2001. 21

GNEZDILOV, A. A. On the physical environment in a type I solar radio noise storm source. **Sov. Astron. Lett.**, v. 14, p. 356–358, 1988. 37

GOLUB, L.; PASACHOFF, J. **The Solar Corona**. [S.l.: s.n.], 2009. 29, 30

GROOT, T. de; LOONEN, J.; SLOTTJE, C. Chains of type I stormbursts. **Solar Physics**, v. 48, p. 321–337, 1976. 35, 68, 69

HANASZ, J. Chains of type I solar radio bursts. **Aust. J. Phys.**, v. 19, p. 635–647, 1966. 35, 67

- HARRA, L. K. Solar flares: the observations. **Mem. Soc. Astron. Italiana**, v. 78, p. 236, 2007. 23
- HATHAWAY, D. H. The solar cycle. **Living Rev. Solar Phys.**, v. 1, n. 7, 2010. 27
- \_\_\_\_\_. **The Sunspot Cycle**. 2013.  
[Http://solarscience.msfc.nasa.gov/SunspotCycle.shtml.ButterflyDiagram](http://solarscience.msfc.nasa.gov/SunspotCycle.shtml.ButterflyDiagram). 19, 27
- IWAI, K. et al. Survey of accelerated particles in a solar active region using hinode/xrt and ground-based type-i radio burst observations. In: Sekii, T.; Watanabe, T.; Sakurai, T. (Ed.). **Hinode-3: The 3rd Hinode Science Meeting**. [S.l.: s.n.], 2012. (Astronomical Society of the Pacific Conference Series, v. 454), p. 249. 22, 23, 53
- KAHLER, S. W. Solar flares and coronal mass ejections. **ARA&A**, v. 30, p. 113–141, 1992. 21
- KAI, K.; MELROSE, D.; SUZUKI, S. **Storms**. 1st. ed. Cambridge: Press Syndicate of the University of Cambridge, 1985. v. 1. 415-441 p. (Solar Radiophysics -Studies of Emission from the Sun at Metre Wavelengths, v. 1). 22, 31, 36
- KARLICKY, M.; JIRICKA, K. Drifting chains of type I radio bursts in the early stage of the two-ribbon flare of may 16, 1981. In: AL., O. E. et (Ed.). **Supplement to 'Solar Radio Storms'**. Trieste, Italy, 1981. p. 81. 68
- KIM, Y.-H. et al. A study of flare-associated x-ray plasma ejections. iii. kinematic properties. **ApJ**, v. 635, p. 1291–1298, dez. 2005. 23
- KOLMOGOROV, A. The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large reynolds' numbers. **Akademiia Nauk SSSR Doklady**, v. 30, p. 301–305, 1941. 41, 75
- KRUCKER, S. et al. Location of type I radio continuum and bursts on yohkoh soft xray maps. **Solar Physics**, v. 160, p. 151–169, 1995. 22, 37
- KRÜGER, A. **Introduction to solar radio astronomy and radio physics**. Dordrecht: D. Reidel Publishing, 1979. 34
- KUNDU, M. R. **Solar Radio Astronomy**. New York: Interscience Publication, 1965. 34
- LANG, K. R.; WILLSON, R. F. Vla observations of a solar noise storm. **The Astrophysical Journal**, v. 319, p. 514–519, 1987. 37
- LEMEN, J. R. et al. The atmospheric imaging assembly (aia) on the solar dynamics observatory (sdo). **Sol. Phys.**, v. 275, p. 17–40, jan. 2012. 47, 48
- MALVILLE, J. M. Characteristics of type III radio bursts. **Astrophysics Journal**, v. 136, p. 266–275, 1962. 36
- MANGENEY, A.; VELTRI, P. On the theory of type I solar radio bursts. **Astron. & Astrophys.**, v. 47, p. 181–192, 1976. 34
- MCLEAN, D. J. Solar activity in the corona. **Astronomical Society of Australia**, v. 4, n. 2, p. 132–138, 1981. 37, 38
- MCLEAN, D. J.; LABRUM, N. R. **Plasma Emission Mechanisms**. 1st. ed. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 1985. v. 1. 177-210 p. (Solar Radiophysics: Studies of emission from the sun at metre wavelengths, 1). 31
- \_\_\_\_\_. **Solar Radiophysics: Studies of emission from the sun at metre wavelengths**. 1. ed. Cambridge

and New York: Cambridge University Press, 1985. v. 1. (Solar Radiophysics: Studies of emission from the sun at metre wavelengths, v. 1). 34

MELÉNDEZ-MORENO, J. L. **Explosões solares decimétricas tipo III associadas com a fase impulsiva do flare solar**. Dissertação (mestrado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE-6382-TDI/601, 1997.

MELROSE, D. B. The relevance of bipolar type I storm structures to the theory of mode coupling in the solar corona. **Astronomical Society of Australia**, v. 2, n. 4, p. 208–210, October 1973. 37

\_\_\_\_\_. Plasma emission due to isotropic fast electrons, and types I,II and V solar radio bursts. **Solar Physics**, v. 43, p. 211–236, 1975. 39

\_\_\_\_\_. A plasma-emission mechanism for type I solar radio emission. **Solar Physics**, v. 67, p. 357–375, 1980. 22, 37, 39

\_\_\_\_\_. Plasma emission - a review. **Sol. Phys.**, v. 111, p. 89–101, mar. 1987. 39

MERCIER, C. et al. The structure of solar radio noise storms. **A&A**, v. 576, p. A136, abr. 2015. 39, 75

MERCIER, C.; TROTTEY, G. Coronal radio bursts: A signature of nanoflares? **ApJ**, v. 474, p. L65–L68, jan. 1997. 22

MONSTEIN, C. Catalog of dynamic electromagnetic spectra observed with callisto. **Physics Astronomy and Electronics Work Bench**, v. 1, n. 1, p. 1–10, jun 2011. 33

MONTMERLE, T. et al. From suns to life: A chronological approach to the history of life on earth 3. solar system formation and early evolution: the first 100 million years. **Earth Moon and Planets**, v. 98, p. 39–95, jun. 2006. 18

NEWKIRK, G. J. The solar corona in active regions and the thermal origin of the slowly varying component of solar radio radiation. **American Astronomical Society**, v. 133, p. 983–1013, 1961. 67, 71

ODSTRCIL, D.; KARLICKY, M. Interaction of weak shock waves with current sheets in an active region to produce nanoflares and chains of type i radio bursts. **Sol. Phys.**, v. 177, p. 415–425, 1998. 22

OLIVEIRA, K. S.; SARAIVA, M. F. O. **Astronomia e Astrofísica**. 2<sup>a</sup> ed. São Paulo: Ed. Livraria da Física, 2004. v. 1. ISBN 8588325233. 20

PARKER, E. N. Nanoflares and the solar x-ray corona. **ApJ**, v. 330, p. 474–479, jul. 1988. 22

RAMESH, R.; KATHIRAVAN, C.; SASTRY, C. Estimation of magnetic field in the solar coronal streamers through low frequency radio observations. **The Astrophysical Journal**, v. 711, p. 1029–1032, March 2010. 71

RAOULT, A.; MANGENEY, A.; VLAHOS, L. An injection model for type iii/v bursts in solar flares. **A&A**, v. 233, p. 229–234, jul. 1990. 33

ROSAL, A. C. **Um Estudo em Microondas do Aprisionamento e Precipitação de Elétrons em Explosões Solares**. Dissertação (Mestrado) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2003. 30

RYBICKI, G. B.; LIGTHMAN, A. P. **Radiative process in Astrophysics**. New York: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 1979. 30

SANTOS, J. C.; WRASSE, C. M. Reorganization of photospheric magnetic fields in active regions during

- energetic flares. **Sol. Phys.**, v. 291, p. 1107–1114, abr. 2016. 52, 74, 75, 77, 78, 80, 84
- SARMA, S. B. S. S. Estimation of magnetic field strength from enhanced solar radio emission. **Aust. J. Phys.**, v. 47, p. 811–815, 1994. 67, 68
- SAWANT, H. S. et al. Observation of harmonically related solar radio zebra patterns in the 1-4 ghz frequency range. **A&A**, v. 396, p. 1015–1018, dez. 2002. 21
- SHANMUGARAJU, A. et al. Statistical characteristics of cmes and flares associated with solar type ii radio bursts. **Sol. Phys.**, v. 217, p. 301–317, nov. 2003. 21
- SODRÉ, Z. **Identificação e Análise de Correntes Tipo I Métricas Registradas pelo CALLISTO-BLEN no Período de 30 de julho a 09 de agosto de 2011**. Dissertação (Ms. THESIS) — Univ. do Vale do Paraíba, São José dos Campos, fev 2013. 21, 53
- SODRÉ, Z. A. L.; CUNHA-SILVA, R. D.; FERNANDES, F. C. R. Analysis of chains of metric solar type I bursts. **Sol. Phys.**, v. 290, p. 159–168, jan. 2015. 65
- SODRÉ, Z. A. L.; FERNANDES, F. C. R. Estimativa do campo magnético coronal utilizando dados de correntes tipo I. In: UNIVAP, X. E. E. L.-A. de Pós-Graduação (Ed.). **Anais**. São José dos Campos: UNIVAP, 2014. 23
- \_\_\_\_\_. Evolution of solar active regions and the occurrence of metric noise storms. In: COLAGE) 10th Latin American Conference on S. G. X. (Ed.). **Anais**. Cusco - Peru: ALAGE - Asociación Latinoamericana de Geofísica Espacial, 2014. 23
- SODRÉ, Z. A. L. et al. Estruturas finas na rádio-emissão solar em ondas métricas registradas pelo callisto-br em 30 de março de 2010. In: UNITAU, X. M. de Pós-Graduação (Ed.). **Anais**. Taubaté - SP: UNITAU, 2011. 21, 35
- SODRÉ, Z. A. L.; SILVA, R. D. C.; FERNANDES, F. C. R. Rádio-emissões solares tipo I associadas a tempestade de ruído em ondas métricas registradas pelo callisto-br. In: ITA, V. E. de Verão de Física do (Ed.). **Anais**. São José dos Campos - SP: ITA, 2012. 21, 35
- SPICER, D. S.; BENZ, A. O.; HUBA, J. D. Solar type I noise storms and newly emerging magnetic flux. **Astron. Astrophys.**, v. 105, p. 221–228, 1981. 37
- \_\_\_\_\_. Solar type i noise storms and newly emerging magnetic flux. **A&A**, v. 105, p. 221–228, jan. 1982. 39, 74
- SUBRAMANIAN, P. Electron acceleration in solar noise storms. **ArXiv Astrophysics e-prints**, jan. 2007. 23, 74
- SVESTKA, K. **Solar Flares**. Dordrecht: D. Reidel Publishing, 1976. ISBN 90-277-0662-X. 29
- TABOADA, R. E. R. et al. Temporal characterization of solar noise storm burst components from signal variability analysis for the september 14, 2005 event. **Cent. Eur. Astrophys. Bull.**, v. 34, p. 135–146, 2010. 22
- TAKAKURA, T. Origin of solar radio type I bursts. **Astronomical Society of Japan**, v. 15, n. 4, p. 462–467, agosto 1963. 37
- THEJAPPA, G. A self-consistent model for the storm radio emission from the sun. **Kluwer Academic Publishers**, v. 132, p. 173–193, 1991. 37
- TLAMICHA, A.; KEPKA, O.; SNIZEK, V. Structure of solar radio type I bursts noise storms in the

100-130 mhz range in the may 17-24, 1981 period. In: AL., O. E. et (Ed.). **Suplement to 'Solar Radio Storms'**. Trieste, Italy, 1981. v. 1, p. 52. 68

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. (Lecture Notes in Physics, Berlin Springer Verlag, v. 656), p. 49. 21

WENTZEL, D. G. Solar type I radio bursts: Shock model. **Astronomy and Astrophysics**, v. 100, p. 20–23, 1981. 37

\_\_\_\_. A theory for the solar type-i radio continuum. **Sol. Phys.**, v. 103, p. 141–151, jan. 1986. 39

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. 33

WILD, J. P.; MCCREADY, L. L. Observations of the spectrum of highintensity solar radiation at metre wavelengths. **CSIRO Australia**, v. 3, p. 387–398, Março 1950. 31

WILD, J. P.; TLAMICHA, A. Spectral evidence on the origin of type I solar radio storms and the coronal magnetic field. **Nature**, v. 203, p. 1128, 1964. 34, 68

\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. **Academy of Sciences of the Czechoslovak**, v. 16, n. 2, p. 73–76, 1965. 34

ZANNA, G. D. et al. A single picture for solar coronal outflows and radio noise storms. **A&A**, v. 526, p. A137, fev. 2011. 22, 23, 54, 55, 63, 73, 75

## A Ocorrência de tempestades tipo I (RNS) para os anos de 2010 a 2015.

Tabela 14 - Ocorrência de tempestades tipo I para o ano de 2010.

<b>Dia</b>	<b>Duração [UT]</b>
13/02/2010	07:00 - 12:00
14/02/2010	07:00 - 12:00
25/03/2010	12:56 - 12:59
28/03/2010	06:00 - 12:00
29/03/2010	06:00 - 12:00
30/03/2010	08:48 - 09:39
02/08/2010	17:02 - 00:00
04/08/2010	15:04 - 15:13
07/08/2010	01:34 - 02:24
20/09/2010	09:14 - 10:57
28/09/2010	05:22 - 06:40
01/10/2010	02:49 - 08:32
11/11/2010	16:12 - 16:19
15/11/2010	03:05 - 05:59
17/11/2010	10:13 - 10:36
06/12/2010	07:12 - 07:27

Fonte: <<ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse.>>

Tabela 15 - Ocorrência de tempestades tipo I para o ano de 2011.

<b>Dia</b>	<b>Duração [UT]</b>
21/01/2011	11:36 - 14:17
22/01/2011	08:20 - 09:23
23/01/2011	01:37 - 00:30
13/02/2011	18:59 - 19:51
14/02/2011	04:50 - 10:00
15/02/2011	00:00 - 07:31/01:50 - 09:33
20/02/2011	05:54 - 06:02
07/03/2011	11:05 - 11:16/14:22 - 15:05
11/03/2011	00:09 - 03:05
14/03/2011	02:31 - 03:16
31/03/2011	05:18 - 05:51
17/04/2011	04:27 - 05:46
18/04/2011	12:04 - 12:43
23/04/2011	11:19 - 11:38
07/05/2011	00:00 - 05:37
29/05/2011	10:48 - 10:54
01/06/2011	02:42 - 09:29

*Continua na próxima página*

Tabela 15 – Continuação da página anterior

<b>Dia</b>	<b>Duração [UT]</b>
29/07/2011	17:38 - 18:52
30/07/2011	00:00 - 03:02/04:58 - 07:32/09:51 - 12:24/10:37 - 12:24
31/07/2011	02:57 - 09:45
01/08/2011	00:00 - 09:46
02/08/2011	06:50 - 07:27/10:27 - 12:07/17:03 - 17:12
03/08/2011	09:13 - 15:32
04/08/2011	02:04 - 05:03
08/08/2011	11:01 - 11:22
09/09/2011	11:52 - 13:08/17:45 - 17:57
10/09/2011	07:40 - 10:40
11/09/2011	01:46 - 03:46
25/09/2011	07:05 - 08:21
26/09/2011	07:06 - 08:39
27/09/2011	15:02 - 18:22
28/09/2011	01:17 - 08:55
29/09/2011	04:53 - 05:38
30/09/2011	17:05 - 19:18
01/10/2011	06:51 - 08:22
02/10/2011	17:44 - 17:58
03/10/2011	00:22 - 01:36
06/10/2011	11:45 - 11:56
20/10/2011	07:14 - 08:37
21/10/2011	06:05 - 11:48
27/10/2011	06:07 - 08:09
29/10/2011	00:00 - 01:39
31/10/2011	00:00 - 04:03
01/11/2011	10:39 - 12:24
02/11/2011	20:43 - 21:10
03/11/2011	19:07 - 20:20
05/11/2011	07:40 - 02:32/16:11 - 17:46
08/11/2011	03:33 - 03:58
09/11/2011	16:50 - 17:28
10/11/2011	12:15 - 13:50
13/12/2011	20:08 - 20:33
22/12/2011	02:05 - 05:22
28/12/2011	12:34 - 18:53
30/12/2011	18:14 - 19:33

Fonte: <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse.>

Tabela 16 - Ocorrência de tempestades tipo I para o ano de 2012.

<b>Dia</b>	<b>Duração [UT]</b>
27/05/2012	07:30 - 09:30/12:55 - 13:26
12/08/2012	14:08 - 15:35
16/08/2012	12:51 - 13:03
31/08/2012	01:29 - 02:33
02/09/2012	03:17 - 08:15/03:17 - 06:43
17/09/2012	14:22 - 14:26
29/09/2012	19:36 - 20:01
05/10/2012	03:59 - 05:51
08/10/2012	22:14 - 23:28
28/10/2012	03:33 - 11:46
19/12/2012	00:00 - 06:57
20/12/2012	00:00 - 01:11

Fonte: <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse.>

Tabela 17 - Ocorrência de tempestades tipo I para o ano de 2013.

<b>Dia</b>	<b>Duração [UT]</b>
05/01/2013	04:52 - 10:54
06/01/2013	15:20 - 20:04
09/01/2013	08:31 - 10:55
10/01/2013	06:26 - 11:39
11/01/2013	06:51 - 10:23/12:43 - 14:07
12/01/2013	08:30 - 11:59
13/01/2013	06:25 - 14:00/07:25 - 11:50
14/01/2013	13:54 - 19:35
15/01/2013	00:00 - 10:55
15/02/2013	17:13 - 17:51
22/02/2013	18:57 - 19:10
23/02/2013	08:37 - 08:51
24/02/2013	10:17 - 10:51
13/03/2013	00:00 - 03:33
14/03/2013	00:58 - 02:15
15/03/2013	07:46 - 08:19/07:47 - 08:19/22:31 - 22:38
18/03/2013	12:57 - 13:11
25/03/2013	00:37 - 01:19
30/03/2013	21:03 - 21:57
31/03/2013	02:43 - 06:59
01/04/2013	18:41 - 18:56
02/04/2013	16:37 - 19:46
03/04/2013	10:38 - 12:00

*Continua na próxima página*

Tabela 17 – *Continuação da página anterior*

<b>Dia</b>	<b>Duração [UT]</b>
04/04/2013	14:20 - 14:23
05/04/2013	23:07 - 23:25
07/04/2013	02:52 - 05:14
08/04/2013	12:33 - 13:49
11/04/2013	03:20 - 05:48/21:16 - 21:33
12/04/2013	06:42 - 13:13
16/04/2013	11:29 - 11:30
22/04/2013	11:08 - 15:42
23/04/2013	01:20 - 14:13
24/04/2013	07:27 - 07:27
26/04/2013	09:55 - 10:30
03/05/2013	21:54 - 22:03
04/05/2013	00:08 - 06:18/23:11 - 23:47
05/05/2013	09:46 - 10:14/12:25 - 12:54
06/05/2013	11:34 - 11:34
07/05/2013	10:29 - 15:34
08/05/2013	10:56 - 17:47
01/06/2013	16:31 - 16:53
02/06/2013	19:51 - 19:55
06/07/2013	03:48 - 17:12
07/07/2013	08:26 - 09:52/11:36 - 17:03
08/07/2013	11:32 - 12:45
09/07/2013	01:34 - 03:24
10/07/2013	03:18 - 04:40
21/07/2013	21:29 - 23:23
20/09/2013	18:42 - 19:40
23/09/2013	05:49 - 06:22
12/10/2013	08:32 - 08:32
26/10/2013	08:27 - 08:34
27/10/2013	12:56 - 14:38
28/10/2013	03:10 - 04:38
29/10/2013	16:14 - 18:30
08/11/2013	04:40 - 05:41
12/11/2013	06:02 - 06:18
13/11/2013	03:01 - 06:53
18/11/2013	10:46 - 10:54
20/11/2013	10:50 - 10:56
22/11/2013	22:13 - 23:23
23/11/2013	04:48 - 05:11/04:50 - 06:00/16:38 - 17:14/18:56 - 18:56

*Continua na próxima página*

Tabela 17 – *Continuação da página anterior*

<b>Dia</b>	<b>Duração [UT]</b>
24/11/2013	17:16 - 17:18
28/11/2013	05:30 - 06:15
12/12/2013	06:45 - 07:11/08:04 - 12:08
15/12/2013	03:55 - 04:15
17/12/2013	01:46 - 03:35
22/12/2013	10:09 - 10:34
23/12/2013	08:52 - 09:32
24/12/2013	14:37 - 14:50
30/12/2013	07:26 - 08:07

Fonte: <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse.>

Tabela 18 - Ocorrência de tempestades tipo I para o ano de 2014.

<b>Dia</b>	<b>Duração [UT]</b>
04/01/2014	12:51 - 14:24
05/01/2014	17:53 - 23:59
06/01/2014	02:35 - 07:01
07/01/2014	00:00 - 03:23
08/01/2014	05:10 - 07:49
09q01/2014	12:24 - 12:31/12:35 - 18:21
10/01/2014	12:05 - 12:12/14:36 - 20:36/17:52 - 22:09
11/01/2014	01:00 - 14:16
14/01/2014	09:24 - 10:20
23/01/2014	05:32 - 07:16
31/01/2014	14:18 - 14:27
01/02/2014	22:08 - 23:04
03/02/2014	22:37 - 23:59
04/02/2014	10:31 - 12:26
11/02/2014	14:18 - 15:48
12/02/2014	17:30 - 17:51
13/02/2014	19:05 - 20:17
14/02/2014	08:20 - 08:31/15:28 - 15:54
15/02/2014	16:14 - 17:42
17/02/2014	03:40 - 06:57
19/02/2014	13:49 - 13:49
20/02/2014	20:00 - 20:24
27/02/2014	16:53 - 16:56
18/03/2014	04:26 - 06:26
19/03/2014	15:59 - 16:33

*Continua na próxima página*

Tabela 18 – *Continuação da página anterior*

<b>Dia</b>	<b>Duração [UT]</b>
21/03/2014	05:56 - 06:27/07:20 - 11:15
22/02/2014	08:06 - 09:41
01/04/2014	22:48 - 23:59
02/04/2014	12:34 - 21:03
03/04/2014	09:03 - 09:09
07/04/2014	23:00 - 23:04
08/04/2014	17:19 - 17:38
10/04/2014	17:33 - 23:33
05/06/2014	11:30 - 20:36
06/06/2014	05:16 - 06:06
10/06/2014	12:21 - 15:23
11/06/2014	18:10 - 18:20
12/06/2014	16:13 - 16:32
30/06/2014	14:16 - 14:19/16:45 - 20:35
01/07/2014	22:26 - 23:09
02/07/2014	04:11 - 09:33
07/07/2014	13:10 - 14:19
08/07/2014	05:22 - 07:49/11:21 - 11:26/12:32 - 12:54/14:38 - 15:09/16:00
09/07/2014	00:20 - 03:30/10:53 - 10:53/11:47 - 11:47/14:01 - 15:57/17:13
10/07/2014	00:48 - 06:00/03:11 - 03:53
11/07/2014	04:32 - 07:10
19/08/2014	03:14 - 04:19
21/08/2014	08:16 - 08:31
26/08/2014	01:10 - 02:09
01/09/2014	09:37 - 09:49
08/09/2014	08:26 - 09:41
09/09/2014	13:05 - 13:42/20:26 - 20:49
25/09/2014	23:00 - 23:18
04/10/2014	05:35 - 05:49
09/10/2014	13:02 - 13:08
14/10/2014	14:00 - 14:26/22:58 - 23:28
15/10/2014	00:20 - 00:22
16/10/2014	14:52 - 16:30
17/10/2014	08:31 - 10:22
03/11/2014	03:16 - 07:48
28/11/2014	05:20 - 05:44/16:36 - 18:24
29/11/2014	02:11 - 02:40/13:47 - 13:47
30/11/2014	08:35 - 10:30
01/12/2014	10:19 - 13:31

*Continua na próxima página*

Tabela 18 – *Continuação da página anterior*

<b>Dia</b>	<b>Duração [UT]</b>
02/12/2014	00:48 - 02:27/21:14 - 21:25
03/12/2014	00:00 - 07:50/03:39 - 03:39
04/12/2014	04:32 - 06:47/12:28 - 14:45/15:58 - 18:22/19:02 - 20:25
05/12/2014	06:21 - 06:23/08:10 - 08:34/14:41 - 16:34/21:14 - 23:40
06/12/2014	04:44 - 05:44/06:11 - 10:47
07/12/2014	12:09 - 13:27
21/12/2014	22:02 - 23:53
22/12/2014	02:30 - 02:50

Fonte: <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse.>

Tabela 19 - Ocorrência de tempestades tipo I para o ano de 2015.

<b>Dia</b>	<b>Duração [UT]</b>
03/01/2015	14:37 - 17:47
04/01/2015	09:13 - 09:27
05/01/2015	03:37 - 05:39
28/01/2015	13:56 - 14:15
29/01/2015	14:21 - 16:06
30/01/2015	01:39 - 02:18
12/03/2015	10:53 - 10:53
15/03/2015	01:38 - 02:38/01:41 - 02:44
30/03/2015	09:58 - 11:37
03/04/2015	07:51 - 10:48/11:43 - 13:57
09/05/2015	06:33 - 08:20/11:17 - 12:02
10/05/2015	20:38 - 20:57
13/05/2015	16:22 - 17:28
18/06/2015	16:58 - 17:24
19/06/2015	04:18 - 04:30
22/06/2015	00:30 - 02:57
23/06/2015	13:21 - 14:11
24/06/2015	08:33 - 09:11
07/07/2015	06:01 - 06:15
08/07/2015	05:11 - 05:36
09/07/2015	10:03 - 10:03
10/07/2015	12:06 - 12:19
07/08/2015	18:44 - 18:58
08/08/2015	11:33 - 13:18/15:46 - 16:03
09/08/2015	10:51 - 11:49
11/08/2015	01:13 - 01:48

*Continua na próxima página*

Tabela 19 – *Continuação da página anterior*

<b>Dia</b>	<b>Duração [UT]</b>
22/08/2015	07:04 - 08:45
24/08/2015	05:05 - 06:28/18:08 - 18:13
25/08/2015	01:58 - 05:56
26/08/2015	00:00 - 07:04/11:50 - 12:02
27/08/2015	16:41 - 17:30
28/08/2015	03:03 - 06:45
18/09/2015	04:48 - 06:39/04:49 - 05:09
28/09/2015	05:44 - 14:42
29/09/2015	07:31 - 08:07
30/09/2015	11:47 - 12:28
01/10/2015	02:58 - 03:10
28/10/2015	06:52 - 08:01
30/10/2015	01:08 - 01:27
17/12/2015	16:46 - 18:56
18/12/2015	00:29 - 00:53
19/12/2015	07:07 - 07:25/14:59 - 14:59
24/12/2015	12:39 - 19:07

Fonte: <<ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/warehouse.>>