

Universidade do Vale do Paraíba  
Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento

JOSÉ AUGUSTO SOUZA E SILVA DUTRA

ESTRUTURAS FINAS TIPO U E TIPO J PRESENTES NA RÁDIO-EMISSÃO SOLAR  
EM ONDAS DECIMÉTRICAS

São José dos Campos, SP  
2010

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

José Augusto Souza e Silva Dutra

ESTRUTURAS FINAS TIPO U E TIPO J PRESENTES NA RÁDIO-EMISSÃO SOLAR  
EM ONDAS DECIMÉTRICAS

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

Orientadores: Prof. Dr. Francisco Carlos Rocha Fernandes  
Prof. Dr. Fernando Luís Guarnieri

São José dos Campos, SP  
2010

D975e

Dutra, José Augusto Sousa e Silva.

Estruturas finas tipo U e tipo J presentes na rádio-emissão solar em ondas decimétricas. / José Augusto Sousa e Silva Dutra. Orientadores Francisco Carlos Rocha Fernandes e Fernando Luís Guarnieri. São José dos Campos, 2010.

1 laser disco. 100 f.

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Física e Astronomia do Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento da Universidade do Vale do Paraíba, 2010.

1. Sol 2. Radiação solar 3. Explosões solares 4. Ondas decimétricas 5. I. Fernandes, Francisco Carlos Rocha, Orient. II. Guarnieri, Fernando Luis, Orient. III. Título

CDU:52

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

Assinatura do aluno:

*José Augusto S.S. Dutra*

Data: 11 de junho de 2010

**JOSÉ AUGUSTO SOUZA E SILVA DUTRA**

**“ESTRUTURAS FINAIS TIPO U E TIPO J PRESENTES NA RÁDIO – EMISSÃO SOLAR EM  
ONDAS DECIMÉTRICAS”**

Dissertação aprovada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre 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:

Prof. Dr. **JOSÉ RICARDO ABALDE GUEDE** (UNIVAP)

Prof. Dr. **FRANCISCO CARLOS ROCHA FERNANDES** (UNIVAP)

Prof. Dr. **FERNANDO LUÍS GUARNIERI** (VSE)

Prof. Dr. **JOSÉ ROBERTO CECATTO** (INPE)

Profª. Dra. Sandra Maria Fonseca da Costa

Diretor do IP&D – UniVap

São José dos Campos, 11 de junho de 2010.

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho a todos os professores do IPD, aos professores do INPE pelos dados de pesquisa e apoio; dedico a todos os colegas mestrandos e doutorandos deste laboratório.

Obrigado.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao Professor Dr. Francisco Carlos Rocha Fernandes (Guga) por sua dedicação esforço e paciência na orientação, sem o que não teria vez este trabalho.

Agradeço ao Grupo de Física do Meio Interplanetário (FMI) da Divisão de Astrofísica (DAS) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) pelos dados das explosões solares analisadas neste trabalho.

Agradeço à Capes e à Univap pela bolsa de mestrado oferecida.

# ESTRUTURAS FINAS TIPO U E TIPO J PRESENTES NA RÁDIO-EMIÇÃO SOLAR EM ONDAS DECIMÉTRICAS

## RESUMO

Neste trabalho é apresentada a análise de 5 estruturas finas presentes nas emissões rádio solares, observadas pelo rádio espectrógrafo “Brazilian Solar Spectroscope” (BSS), na faixa de frequências decimétricas (1000 – 2500 MHz), entre junho de 2000 e outubro de 2001. Com base em suas características morfológicas identificadas nos espectros dinâmicos, as estruturas finas foram classificadas como tipo U ou tipo J. Tais estruturas são variantes das emissões tipo III e suportam as hipóteses de geração por mecanismo de emissão de plasma, a partir da interação de feixes de elétrons acelerados nos “flares” se propagando ao longo das estruturas magnéticas fechadas com o plasma da atmosfera solar confinado. As características espectro-temporais das 5 estruturas finas foram medidas nos espectros dinâmicos e os parâmetros do agente e da fonte emissora foram determinados. Os valores obtidos são: a densidade de fluxo das emissões é inferior a 20 – 80 s.f.u.; o comprimento dos arcos magnéticos é da ordem de  $(0,3 - 5,1) \times 10^{10}$  cm; a velocidade dos feixes de elétrons está no intervalo de  $(0,47 - 1,16) \times 10^5$  km/s; a temperatura do cume dos arcos magnéticos é  $(2,5 - 15,5) \times 10^6$  K; e o limite inferior para a intensidade dos campos magnéticos na região do plasma confinado é de 7 – 22 G. Os resultados obtidos são discutidos e comparados com determinações publicadas na literatura.

**Palavras-chave:** Sol, “flares” solares, emissão decimétrica, estruturas finas tipo U e tipo J.



## FINE STRUCTURES TYPE U AND TYPE J AT DECIMETER SOLAR RADIO EMISSION

### ABSTRACT

In this work the analysis of 5 fine structures at the solar radio emission, observed between June, 2000 and October, 2001 by the Brazilian Solar Spectroscope (BSS), in the decimeter frequency band of (1000 - 2500 MHz), is presented. Based on their morphological characteristics identified in the dynamic spectra, the fine structures had been classified as type U or type J. Such emissions are variants of the type III bursts. They support the hypothesis of generation by plasma emission mechanism, from the interaction of electron beam accelerated during the solar flares and propagating throughout the closed magnetic structures with the trapped plasma of the solar corona. The spectral and temporal characteristics of the 5 fine structures had been measured from the dynamic spectra and the parameters of the agent and the emitting source had been determined. The values obtained are: the flux density of the structures is less than 20 - 80 s.f.u.; the loop size is  $(0.3 - 5.1) \times 10^{10}$  cm; the electron beam velocity is in the range of  $(0.47 - 1.16) \times 10^5$  km/s; the temperature of coronal loop apex is of the order of  $(2.5 - 15.5) \times 10^6$  K; and the low limit for the magnetic field is of 7 - 22 G. The results are discussed and compared with previous determinations published in literature.

**Keywords:** Sun, solar flares, decimeter emission, fine structures type U and type J.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1	Diagnóstico e Investigação de Rádio Emissões Solares	1
1.2	Motivação para o desenvolvimento do trabalho	3
1.3	Objetivos	4
1.3.1	Objetivo Geral	4
1.3.2	Objetivos Específicos	4
1.4	Estrutura da dissertação	5
<b>2</b>	<b>A FENOMENOLOGIA E A FÍSICA DAS EMISSÕES SOLARES EM ONDAS DECIMÉTRICAS</b>	<b>6</b>
2.1	O Sol - Breve revisão das características e da estrutura solar	6
2.1.1	A estrutura solar	6
2.1.2	A distribuição vertical de temperatura e densidade	8
2.2	“Flares” Solares	10
2.2.1	Fases de um “flare” solar	11
2.2.2	Regiões de aceleração	13
2.3	Rádio emissões solares	14
2.3.1	Explosões Tipo I	16
2.3.2	Explosões Tipo II	17
2.3.3	Explosões Tipo III	17
2.3.4	Explosões Tipo IV	17

2.3.5	Explosões Tipo V	18
2.4	Emissões solares na faixa de ondas decimétricas	18
2.4.1	Estruturas finas na rádio emissão decimétrica	19
2.4.2	Explosões tipo III e variantes	20
2.4.3	Explosões tipo U / U invertido	22
2.4.4	Explosões tipo J, tipo N e tipo M	22
2.5	Emissão de Plasma	23
2.6	Geometria magnética da região de aceleração	26
<b>3</b>	<b>INSTRUMENTAÇÃO</b>	<b>30</b>
3.1	O Brazilian Solar Spectroscope (BSS)	30
3.2	Descrição e características do BSS	31
3.3	Programas de visualização e tratamento de dados	35
<b>4</b>	<b>SELEÇÃO E ANÁLISE DAS EXPLOSÕES TIPO U E J DECIMÉTRICAS</b>	<b>36</b>
4.1	Seleção das explosões solares tipo U e tipo J	36
4.2	Explosões tipo U e tipo J selecionadas e atividade solar associada	37
4.2.1	Explosão tipo U de 06 de junho de 2000 (#1)	37
4.2.2	Explosão tipo U de 12 de dezembro de 2000 (#2)	39
4.2.3	Explosão tipo J de 07 de junho de 2001 (#3)	40
4.2.4	Explosão tipo J de 22 de agosto de 2001 (#4)	41
4.2.5	Explosão tipo U de 25 de outubro de 2001 (#5)	42
4.3	Parâmetros observacionais das explosões solares tipo U e tipo J	44

4.4	Análise dos dados das explosões tipo U e tipo J	48
4.4.1	Taxa de deriva em frequência	48
4.4.2	Densidade de fluxo (intensidade da rádio-emissão)	50
4.4.3	Densidade eletrônica	51
4.4.4	Tempo de vida dos feixes de elétrons	52
4.4.5	Velocidade do feixe de elétrons	52
4.4.6	Escala de altura de densidade eletrônica	53
4.4.7	Temperatura da região	53
4.4.8	Intensidade do Campo Magnético	54
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>55</b>
5.1	Densidade de fluxo	55
5.2	Taxa de deriva em frequência dos ramos ascendente e descendente	56
5.3	Velocidade do feixe de elétrons	57
5.4	Temperatura do arco	58
5.5	Intensidade do campo magnético	60
5.6	Resumo dos resultados	60
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO, COMENTÁRIOS FINAIS E PLANOS FUTUROS</b>	<b>62</b>
6.1	Sugestões para trabalhos futuros	64
	<b>REREFÊNCIAS</b>	<b>65</b>
	<b>APÊNDICE A - CALIBRAÇÃO EM DENSIDADE DE FLUXO</b>	<b>72</b>

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.1 – Ilustração representando como a caracterização da atmosfera solar (cromosfera e coroa) foi se tornando mais detalhada ao longo das últimas décadas. A partir da década de 2000, a atmosfera solar é caracterizada como uma região bastante complexa e fortemente não-homogênea, dominada por processos dinâmicos, como fluxos de material aquecido e/ou resfriado, presença de partículas não-térmicas, fenômenos de reconexão magnética de linhas de campo, emissão de plasma aquecido, e a presença de choques, turbulência e ondas. .... 2
- Figura 2.1 – Representação esquemática da estrutura solar, na qual são mostrados o núcleo, as zonas radiativa e convectiva e as camadas da atmosfera solar: fotosfera, cromosfera e coroa. .... 7
- Figura 2.2 – Perfil de temperatura no Sol como função da altura através das diversas camadas, desde o centro até a coroa solar. .... 9
- Figura 2.3 - Perfil de densidade no Sol como função da altura, através das diferentes camadas, desde o centro até a coroa solar. .... 9
- Figura 2.4 - Esquema representando a evolução de um “flare” solar típico em diferentes faixas do espectro eletromagnético (de ondas de rádio a raios-X e gama). Mostra as fases precursora, impulsiva e gradual. .... 11
- Figura 2.5 – Esquema representando a geometria típica do cenário onde ocorre um “flare” solar. Mostrado a região de aceleração, no topo do arco magnético, onde ocorre a reconexão magnética, os feixes de elétrons viajando rumo à coroa (feixe subindo) e à fotosfera (feixe descendo), e as regiões de emissão em raios-X moles e duros. .... 15
- Figura 2.6 – Esquema com os diversos tipos de rádio emissões solares observadas no intervalo de rádio frequências entre 10 MHz e 30 GHz. .... 16
- Figura 2.7 - Diagrama de blocos representando as diversas etapas do processo de emissão de plasma (para elétrons acelerados durante um “flare” solar). .... 26

Figura 2.8 – Imagem de arcos coronais localizados no limbo solar obtidas pelo satélite TRACE, em 6 de Novembro de 1999 (02:30 UT), no ultravioleta (em 171 Å), cuja emissão é característica para plasmas de 1 MK. ....	27
Figura 2.9 – Esquemas de configurações para o mecanismo de reconexão magnética entre linhas de campo de arcos magnéticos: (a) configuração tipo X, gerada pela aproximação de duas regiões ativas; (b) configuração tipo Y, reconexão entre linhas de campo abertas e fechadas numa região ativa bipolar; e (c) reconexão entre um arco emergente e um pré-existente com polaridades opostas.....	28
Figura 2.10 – (Esquerda) Representação da configuração magnética de arcos interagindo nas regiões de aceleração. (Direita) Respective espectros dinâmicos das emissões rádio geradas por feixes de elétrons acelerados nas linhas de campo magnético abertas ou fechadas, correspondente às diferentes configurações magnéticas. ....	29
Figura 3.1 - Antena de 9 metros de diâmetro do BSS instalada no campus do INPE, em Cachoeira Paulista/SP.....	32
Figura 3.2 - Diagrama de blocos representando o “Brazilian Solar Spectroscope”.....	33
Figura 4.1 – Espectro dinâmico do BSS da explosão tipo U registrada em 06 de junho de 2000. ....	38
Figura 4.2 - Perfil em raios-X mole do satélite GOES-10, em 06 de junho de 2000. A seta indica o instante aproximado (~16:28 UT) de ocorrência da explosão tipo U, associada à fase de decaimento de um “flare” classificado como X2.3. ....	39
Figura 4.3 - Espectro dinâmico da explosão tipo U registrada pelo BSS em 12 de dezembro de 2000. ....	40
Figura 4.4 - Perfil em raios-X mole do satélite GOES-10, em 12 de dezembro de 2000. A seta indica o instante aproximado (~14:43 UT) de ocorrência da explosão tipo U, associada à fase impulsiva de um “flare” classificado como M1.3.....	40
Figura 4.5 - Espectro dinâmico da explosão tipo J registrada pelo BSS em 07 de junho de 2001. ....	41

Figura 4.6 - Perfil em raios-X mole do satélite GOES-8, em 07 de junho de 2001. A seta indica o instante aproximado (~16:11 UT) de ocorrência da explosão tipo J, associada à fase impulsiva de um “flare” classificado como C2.5.....	41
Figura 4.7 - Espectro dinâmico de emissão tipo J registrada em 22 de agosto de 2001. ....	42
Figura 4.8 - Perfil em raios-X mole do satélite GOES-10, em 22 de agosto de 2001. A seta indica o instante aproximado (~15:14 UT) de ocorrência da explosão tipo J, associada a um “flare” classificado como C3.7.....	42
Figura 4.9 - Espectro dinâmico de emissão tipo U registrada em 25 de outubro de 2001. A Faixa clara horizontal representa um sinal de interferência. ....	43
Figura 4.10 - Perfil em raios-X mole do satélite GOES-10, em 25 de outubro de 2001. A seta indica o instante aproximado (~15:13 UT) de ocorrência da explosão tipo U, associada a um “flare” classificado como X1.3.....	43
Figura 4.11 – Espectro dinâmico esquematizado de uma explosão tipo U, no qual são ilustrados os seguintes parâmetros observacionais: tempo de início ( $t_i$ ); tempo de fim ( $t_f$ ); duração total ( $\Delta t$ ); intervalo de tempo do ramo ascendente ( $\Delta t_a$ ); intervalo de tempo do ramo descendente ( $\Delta t_d$ ); frequência de início ( $f_i$ ); frequência de fim ( $f_f$ ); frequência de retorno ( $f_r$ ); banda total de frequência ( $\Delta f$ ); banda de frequência do ramo ascendente ( $\Delta f_a$ ); banda de frequência do ramo descendente ( $\Delta f_d$ ) e largura de banda instantânea ( $\Delta f_i$ ). ....	46
Figura 4.12 – Perfis temporais (pseudo 3D –da explosão tipo J registrada pelo BSS em 07 de junho de 2001. ....	46
Figura 6.1 - Representação esquemática (fora de escala) de uma região ativa com a presença de arcos magnéticos em interação. São identificados os intervalos de valores dos parâmetros (velocidade do feixe de elétrons, temperatura no topo do arco, intensidade do campo magnético, comprimento do arco e densidade eletrônica) determinados a partir da análise das estruturas finas tipo U e tipo J.....	63
Figura A.1 - Registros da calibração em intensidade feita pela variação do nível de referência de 1 a 9 dB: perfil temporal (acima) e espectro dinâmico (abaixo). ....	72

Figura A.2 – Fragmento da tela da homepage do “Solar Geophysical Data”, que fornece a intensidade de fluxo diária para diferentes frequências.....73



## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Principais características médias do Sol.....	6
Tabela 3.1 - Principais características do BSS .....	32
Tabela 4.1 – Explosões tipo U e tipo J selecionadas para a análise .....	37
Tabela 4.2 – Resoluções temporal e espectral dos dados das explosões selecionadas.....	47
Tabela 4.3 – Parâmetros observados das explosões tipo U e tipo J selecionadas. ....	48
Tabela 5.1 – Frequência relativa ao canal de emissão máxima e valores de intensidade de fluxo do “background” e do pico da emissão das explosões analisadas. ....	55
Tabela 5.2 – Taxa de deriva em frequência dos ramos ascendente e descendente das explosões analisadas.....	57
Tabela 5.3 - Resultados da análise das explosões tipo U e tipo J.....	61
Tabela 5.4 – Comparação dos resultados obtidos no presente trabalho, da análise das explosões tipo U e tipo J, para a densidade de fluxo ( $S$ ), a velocidade do feixe de elétrons ( $v_b$ ), a temperatura do cume da região emissora ( $T$ ) e o limite inferior para a intensidade do campo magnético ( $B_{min}$ ), com trabalhos publicados na literatura.....	61

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

BDA	- “Brazilian Decimetric Array” (Arranjo Decimétrico Brasileiro)
BLEN	- “Bleien Observatory”
BSS	- “Brazilian Solar Spectroscope” (Espectrógrafo Solar Brasileiro)
CAPES	- Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CCS	- Centro de Controle de Satélites
CME	- “Coronal Mass Ejection” (Ejeção Coronal de Massa)
DAS	- Divisão de Astrofísica
EGSO	- “European Grid of Solar Observations”
FMI	- Física do Meio Interplanetário
GOES	- “Geostationary Operational Environmental Satellite”
GPS	- “Global Positioning System” (Sistema de Posicionamento Global)
HOLL	- “Holloman Observatory”
HXIS	- “Hard X-ray Imager Spectrometer”
HXR	- “Hard X-Ray” (raios-X duros – de alta energia)
INPE	- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
L	- Leste
LASCO	- “Large Angle and Spectrometric Coronagraph Experiment”
LNA	- “Low Noise Amplifier” (amplificador de baixo ruído)
N	- Norte
NOAA	- “National Oceanic and Atmospheric Administration”

O	- Oeste
ONDR	- “Observatório Ondrejov”
POTS	- “Potsdam Observatory”
RS	- “Reverse Slope” (inclinação inversa da taxa de deriva em frequência: de baixa para alta frequência)
S	- Sul
SBRS	- “Solar Broadband Radio Spectrometer” (Rádio-Espectrômetro Solar de Banda Larga)
s.f.u.	- “solar flux unit” (unidade de fluxo solar, 1 s.f.u. = $10^{-22}$ W/Hz m <sup>2</sup> )
SEC	- “Solar Event Catalogue” (Catálogo de Eventos Solares)
SGD	- “Solar Geophysical Data”
SGMR	- “Sagamore Hill Solar Radio Observatory”
SMM	- “Solar Maximum Mission”
SOHO	- “Solar and Heliospheric Observatory”
SPIDR	- “Space Physics Interactive Data Resource”
SVTO	- “San Vito Solar Observatory”
SXR	- “Soft X-Ray” (raios-X moles – de baixa energia)
TRACE	- “Transition Region and Coronal Explorer”
UNIVAP	- Universidade do Vale do Paraíba
UT	- “Universal Time” (Tempo Universal)
VLA	- “Very Large Array”

## LISTA DE SÍMBOLOS

$B$	– Intensidade de campo magnético, Gauss
$B_{min}$	- Limite inferior para a intensidade do campo magnético na região de plasma confinado no arco, Gauss
$c$	– Velocidade da luz no vácuo ( $\sim 3 \times 10^8$ m/s)
$df/dt$	– Taxa de deriva em frequência, MHz/s
$f$	– Frequência, Hz
$f_a$	– Frequência usada na calibração em fluxo, Hz
$f_b$	– Frequência usada na calibração em fluxo, Hz
$f_f$	– Frequência final da banda da emissão, Hz
$f_i$	– Frequência inicial da banda da emissão, Hz
$f_p$	– Frequência de plasma, Hz
$f_r$	– Frequência de retorno, Hz
$H$	- Escala de altura de densidade eletrônica, km
$k_b$	– Constante de Boltzmann ( $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K)
$L$	– Extensão ou comprimento do arco magnético, cm
$N_e$	– Densidade eletrônica, partículas $\text{cm}^{-3}$
$p$	– Pressão, Pa ou $\text{N/m}^2$
$s$	– Parâmetro do harmônico ( $s = 1$ para o estado fundamental, $s = 2$ para o segundo harmônico e assim por diante)
$S_o$	– Densidade de fluxo do solar calmo ("background"), s.f.u.
$T$	– Temperatura, K

- $t_D$  – Tempo de colisão, s
- $v_b$  – Velocidade do feixe de elétrons, km/s
- $\beta$  – Parâmetro beta, razão entre pressão magnética e pressão do gás, adimensional
- $\Delta f$  – Banda de frequência, Hz
- $\Delta t$  – Duração total, s
- $\pi$  – Número Pi (~3,141592...)
- $\theta$  - Ângulo que depende da posição da região ativa no disco solar, °

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Diagnóstico e Investigação de Rádio Emissões Solares

Com o avanço tecnológico e a melhoria nas resoluções dos instrumentos de observação solar, ocorrido nas últimas décadas, principalmente com relação aos instrumentos imageadores, como os rádio-interferômetros ou os satélites equipados com medidores de raios-X e ultravioleta, o diagnóstico e a investigação de fenômenos solares vem obtendo grandes avanços. Estes avanços têm contribuído para uma melhor compreensão dos mecanismos físicos responsáveis por estes fenômenos e particularmente de seu diagnóstico para o aprimoramento da caracterização da estrutura da atmosfera solar (cromosfera e coroa solar).

A Figura 1.1 mostra um esquema de como os detalhes da estrutura da atmosfera solar passaram a ser melhor conhecidos a partir da década de 1950.

Além disso, as observações solares na faixa de rádio-frequências, 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, como os "flares"<sup>1</sup> solares, as erupções filamentosares e as ejeções coronais de massa (CME, do inglês Coronal Mass Ejection).

Os dados de emissões solares nestas faixas de ondas de rádio são importantes para a investigação de diversos problemas ainda em discussão na física solar. Tais questões estão principalmente relacionadas a processos de armazenamento e liberação de energia, à aceleração e o transporte de partículas e a caracterização e localização da região de aceleração. Pick , Klein e Trotter (1990), Haisch , Strong e Rodono (1991), Kahler (1992), Hudson e Ryan (1995) e Bastian, Benz e Gary. (1998) publicaram revisões sobre o diagnóstico e a análise de emissões rádio solares associadas aos "flares".

---

<sup>1</sup> Optou-se por manter o termo "flare" sem tradução.

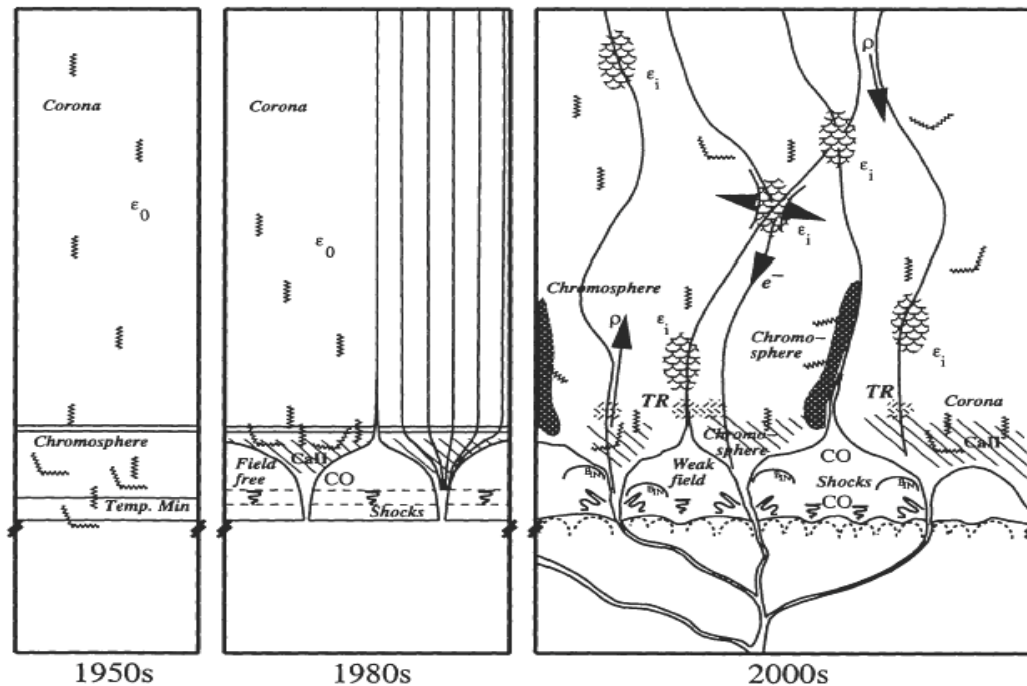


Figura 1.1 – Ilustração representando como a caracterização da atmosfera solar (cromosfera e coroa) foi se tornando mais detalhada ao longo das últimas décadas. A partir da década de 2000, a atmosfera solar é caracterizada como uma região bastante complexa e fortemente não-homogênea, dominada por processos dinâmicos, como fluxos de material aquecido e/ou resfriado, presença de partículas não-térmicas, fenômenos de reconexão magnética de linhas de campo, emissão de plasma aquecido, e a presença de choques, turbulência e ondas.

Fonte: adaptada de Aschwanden (2004).

Segundo Harra (2007), diferentes diagnósticos observacionais de fenômenos solares contribuem para a construção de uma melhor modelagem para os “flares” solares. Este autor ressalta que diversos fenômenos e características associadas aos “flares” necessitam ainda de melhor compreensão, pois, devido à grande complexidade dos fenômenos solares, os modelos ainda não são capazes de eficientemente descrever todos os aspectos observados.

As emissões rádio solares, particularmente as observadas na faixa de ondas decimétricas, são importantes diagnósticos para investigações dos “flares” e outros eventos solares impulsivos. Isso se deve ao fato de que a análise dessas emissões possibilita a determinação da densidade eletrônica da fonte emissora, quando a emissão de plasma dos feixes de elétrons acelerados é o mecanismo de emissão gerador e/ou a determinação do campo magnético, quando o mecanismo de emissão responsável é a emissão girossincrotrônica dos elétrons aprisionados nas estruturas magnéticas dos arcos coronais (BENZ, 1996).

É justamente neste contexto que as investigações de dados de emissões solares registradas em ondas decimétricas pelo “Brazilian Solar Spectroscop” (BSS) (FERNANDES, 1992; 1997; SAWANT et al., 2001) são importantes. O BSS é o único rádio espectrógrafo do hemisfério Sul terrestre dedicado exclusivamente ao monitoramento da atividade solar na faixa de ondas decimétricas.

As observações solares são realizadas pelo BSS com alta resolução temporal (10-100 ms) e alta resolução espectral (1-10 MHz) (FERNANDES, 1992; FERNANDES et al., 2000a) permitem o registro e a investigação de estruturas finas em tempo e frequência presentes nas emissões rádio detectadas.

Tais observações e análises de estruturas finas na rádio-emissão em ondas decimétricas representam diagnóstico de feixes de elétrons energéticos se propagando e interagindo com o plasma da atmosfera solar e da ocorrência de emissão não-térmica. Portanto, são bastante relevantes para o estudo da localização da emissão de rádio e da caracterização de parâmetros da configuração (estrutura) ou morfologia magnética das regiões de aceleração (ASCHWANDEN, BENZ; MONTELLO, 1994).

## **1.2 Motivação para o desenvolvimento do trabalho**

Conforme exposto na seção anterior, a análise de estruturas finas permite investigar detalhes dos mecanismos de emissão de plasma e de características da fonte. Em particular, estruturas finas denominadas tipo III, tipo U e tipo J (de acordo com suas variações morfológicas nos espectros dinâmicos registrados) têm sido interpretadas como resultantes da emissão de plasma gerada por elétrons acelerados durante os “flares” solares, e que se propagam ao longo de campos magnéticos (dos arcos magnéticos) presentes na cromosfera e baixa corona solares.

Desta forma, a existência de diversas emissões rádio solares já registradas com altas resoluções temporal e espectral pelo BSS ao longo do ciclo solar #23 (entre 1998 e 2002) motivou a realização deste trabalho, com a finalidade de identificar estruturas finas caracterizadas pela morfologia identificada a partir dos espectros dinâmicos como explosões tipo U e tipo J, além de promover a análise na busca por determinação de parâmetros da emissão e da fonte, possibilitando revelar características da geometria magnética e localização das regiões de aceleração, seguindo metodologias de análise aplicadas anteriormente. Neste



sentido, é proposto neste trabalho, a partir dos resultados obtidos da determinação dos parâmetros da fonte um cenário para a região ativa.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo Geral**

O objetivo deste trabalho é a identificação e a análise de emissões rádio solares registradas na faixa de ondas decimétricas pelo BSS apresentando estruturas finas tipo U e tipo J, com o intuito de determinar parâmetros da fonte emissora.

#### **1.3.2 Objetivos Específicos**

A fim de alcançar o objetivo geral proposto, alguns objetivos específicos foram estabelecidos e cumpridos:

- familiarização com o instrumento BSS e com os procedimentos de observação e com o pacote de análise dos dados (BSSView);
- familiarização com o formato e a estrutura dos dados de explosões solares em ondas decimétricas registradas pelo BSS;
- revisão dos principais conceitos teóricos sobre a fenomenologia e a física das emissões rádio solares;
- determinação dos parâmetros observacionais (frequências de início e fim, frequência de retorno, banda total de frequência, duração total, intervalo de tempo e banda de frequência dos ramos ascendente e descendente) das emissões rádio solares caracterizadas como explosões tipo U e tipo J, selecionadas; e
- estimativa da intensidade do campo magnético na região de emissão associada às explosões solares analisadas.

#### **1.4 Estrutura da dissertação**

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão conceitual sobre os “flares” solares, suas fases e as principais emissões associadas com sua ocorrência. São revisados os principais aspectos da fenomenologia e da física das emissões solares observadas em ondas de rádio, principalmente na faixa de ondas decimétricas, em particular das estruturas finas geradas pelo processo de emissão de plasma, como as estruturas finas tipo U e tipo J, tema desta Dissertação.

O Capítulo 3 é dedicado à descrição sucinta do instrumento responsável pela aquisição dos dados utilizados, o “Brazilian Solar Spectroscope” (BSS).

O Capítulo 4 é dedicado às observações e dados selecionados e, por fim, é descrita a metodologia empregada para a análise dos dados das estruturas finas tipo U e tipo J selecionadas e para a determinação dos parâmetros.

Os resultados obtidos da análise das estruturas finas tipo U e tipo J são apresentados e discutidos no Capítulo 5, incluindo a comparação com resultados publicados anteriormente na literatura.

O Capítulo 6 é reservado para as conclusões e considerações finais a cerca do trabalho realizado, dos resultados obtidos e objetivos alcançados. São apresentadas também sugestões para trabalhos futuros que possam aprimorar ou complementar este trabalho.

## 2 A FENOMENOLOGIA E A FÍSICA DAS EMISSÕES SOLARES EM ONDAS DECIMÉTRICAS

### 2.1 O Sol - Breve revisão das características e da estrutura solar

O Sol é a estrela mais próxima e responsável pela vida da Terra. Portanto, os estudos de seus fenômenos e de sua influência são de grande relevância.

A Tabela 2.1 apresenta as principais características do Sol (SILVA, 2006; OLIVEIRA; SARAIVA, 2004).

Tabela 1.1 – Principais características médias do Sol.

Massa	$1,989 \times 10^{30}$ kg ~333.000 massas terrestres
Raio	696.000 km ~110 vezes maior que o raio da Terra
Densidade	Média: $1409 \text{ kg/m}^3$ Central: $160.000 \text{ kg/m}^3$
Velocidade de Escape	618 km/s
Distância à Terra	$1,496 \times 10^8$ km ~150 milhões de km
Luminosidade	$3,83 \times 10^{26}$ W
Temperatura	Superfície: 5750 K Central: 15.000.000 K
Idade	Cerca de 4,5 bilhões de anos
Composição Média	H (~92,1%) He (~7,8 %) O + C (~0,1%) Outros (< 0,1%)
Período de rotação	Equador: ~26 dias Pólos: ~30 dias

#### 2.1.1 A estrutura solar

A estrutura solar é basicamente dividida em duas regiões: o interior solar e a atmosfera solar. O interior é a região que vai do centro até a superfície (apesar do Sol não ter uma superfície

sólida). Cada uma dessas regiões é subdividida em 3 camadas. A partir da região mais central para fora, as camadas são: o núcleo, a zona radiativa, a zona convectiva (que compõem o interior solar), a fotosfera, a cromosfera e a coroa (que compõem a atmosfera solar). Entre a zona radiativa e a zona convectiva existe uma fina camada chamada **tacoclina** e entre a cromosfera e a coroa existe uma região de transição.

No interior solar, a região mais interna é chamada de **núcleo**, e corresponde à aproximadamente 10% da massa solar. É no núcleo que ocorrem as reações termonucleares de conversão do hidrogênio em hélio, a fonte de energia que mantém o Sol brilhando. Esta energia gerada no núcleo é transportada para o exterior inicialmente por radiação, através de uma camada chamada **zona radiativa** (SILVA, 2006).

A radiação domina até uma espessura de até cerca de 70% do raio solar. No entanto, na camada mais externa do interior, a convecção passa a dominar, uma vez que prevalece a absorção desta radiação e o transporte passa a ser dominado pelos movimentos de material por células convectivas, na chamada **zona convectiva**. Entre as camadas radiativa e convectiva há uma fina camada chamada **tacoclina**, cujo nome faz referência à grande variação de velocidade sofrida pelo plasma nesta transição. Tal variação brusca de velocidade provavelmente é responsável pela geração dos campos magnéticos abaixo da superfície solar.

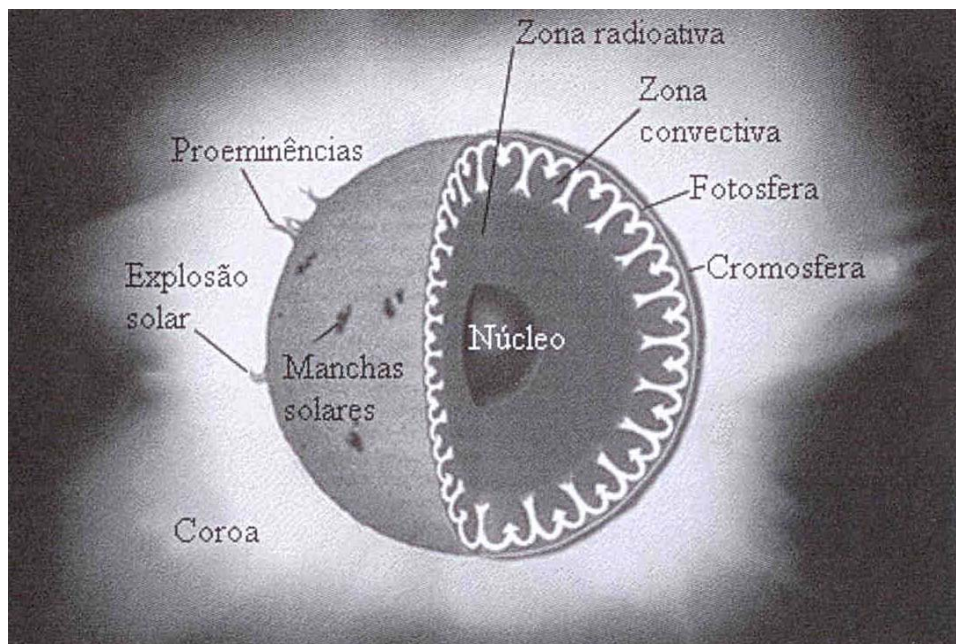


Figura 1.2 – Representação esquemática da estrutura solar, na qual são mostrados o núcleo, as zonas radiativa e convectiva e as camadas da atmosfera solar: fotosfera, cromosfera e coroa.

Fonte: Silva (2006).

Conforme mencionado anteriormente, o Sol não possui uma superfície sólida, pois é uma esfera de gás. A chamada superfície representa a região a partir da qual não é possível visualizar as camadas mais internas. A partir desta região, considera-se a atmosfera solar, que é bastante rarefeita.

A camada mais interna da atmosfera, logo acima da superfície solar é a chamada **fotosfera**, que é bastante fina, com apenas cerca de 500 km e relativamente fria. Acima da fotosfera, está a chamada **cromosfera**, uma camada de cor avermelhada, onde a temperatura atinge milhares de graus. Esta camada é observada em comprimentos de onda no visível, no ultravioleta e em frequências de rádio (SILVA, 2006).

A última camada da atmosfera solar é chamada **coroa**, cujos limites não se estendem por todo o meio interplanetário. Na coroa, a temperatura atinge milhões de graus. Devido à baixa luminosidade, a coroa pode ser visualizada apenas durante os eclipses solares, mas pode ser observada em raios-X. Entre a cromosfera e a coroa encontra-se a chamada **região de transição**, muito fina, aproximadamente 100 km em que acontecem mudanças intensas de densidade e temperatura, em função da altura da atmosfera solar. Ao longo de todas as camadas da atmosfera solar ocorrem as explosões solares.

### 2.1.2 A distribuição vertical de temperatura e densidade

A densidade é máxima no centro do Sol, sendo da ordem de  $150.000 \text{ kg/m}^3$  e decresce em direção à superfície. A variação da temperatura segue o mesmo comportamento, caindo de  $15.000.000 \text{ K}$ , no núcleo, para cerca de  $5.800 \text{ K}$  na fotosfera solar. Tanto a densidade quanto a temperatura decrescem bruscamente logo abaixo da superfície.

A Figura 2.2 apresenta o perfil de temperatura em função da altura ao longo das diferentes camadas do interior e atmosfera solar. Pode-se notar claramente a diminuição da temperatura desde o núcleo até a superfície. A partir da fotosfera a temperatura volta a subir, havendo um aumento abrupto na temperatura na região de transição, que separa a cromosfera, relativamente fria e a coroa extremamente quente.

A distribuição da densidade solar em função da altura ao longo das diferentes camadas do interior e atmosfera solar é mostrada na Figura 2.3.

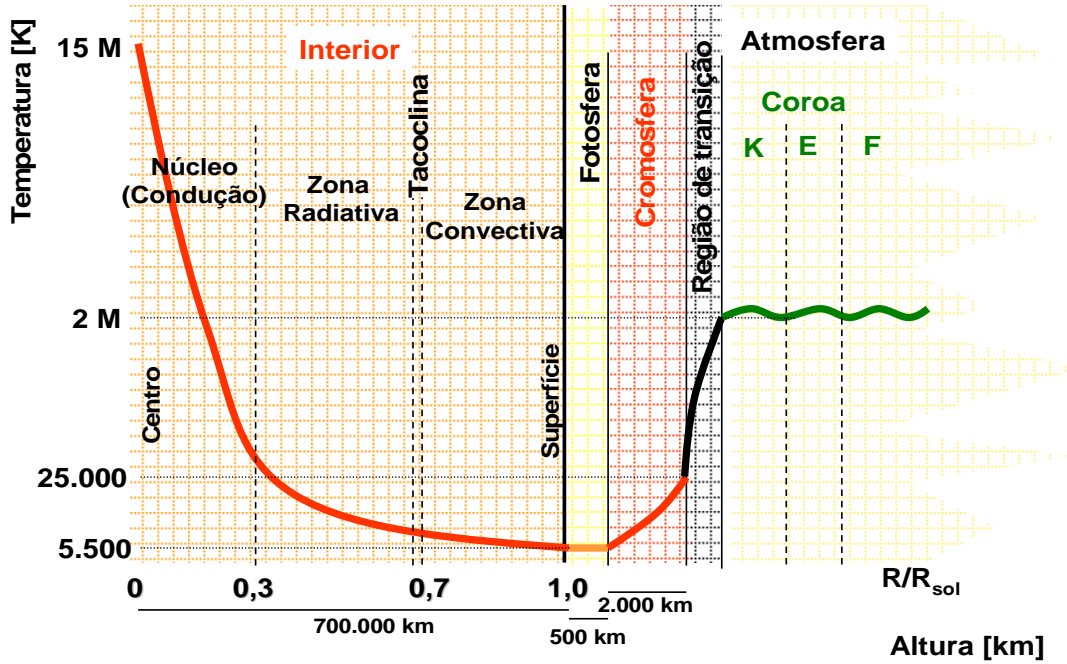


Figura 1.3 – Perfil de temperatura no Sol como função da altura através das diversas camadas, desde o centro até a coroa solar.

Fonte: Adaptada de Boczko (2007).

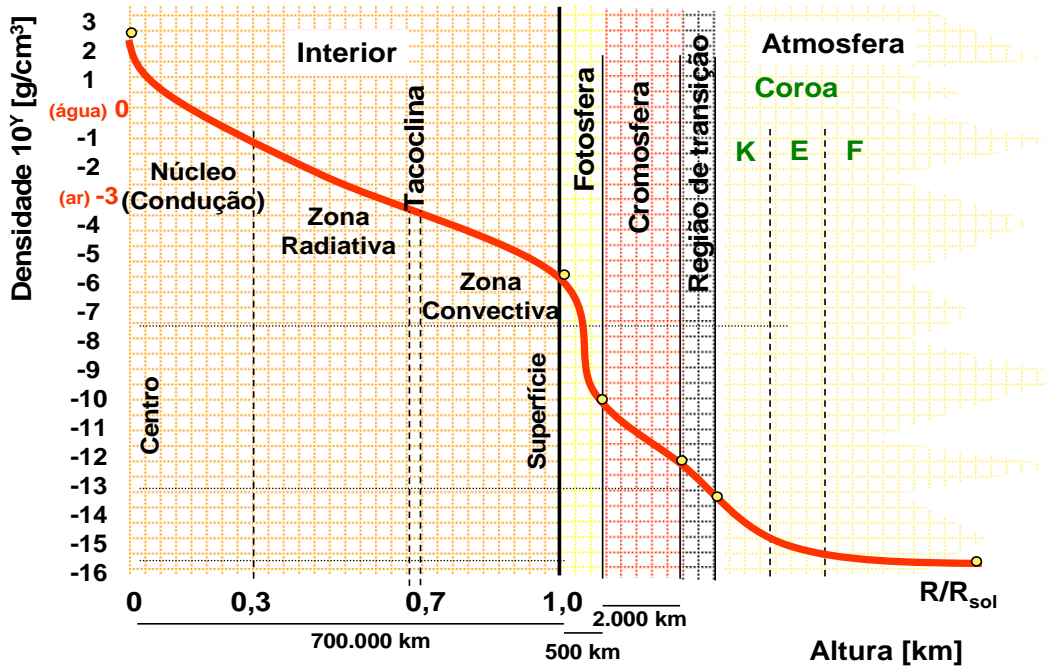


Figura 1.4 - Perfil de densidade no Sol como função da altura, através das diferentes camadas, desde o centro até a coroa solar.

Fonte: Adaptada de Boczko (2007)

## 2.2 “Flares” Solares

Os "flares" solares são fenômenos explosivos que liberam grandes quantidades de energia, da ordem de  $10^{29}$ - $10^{33}$  erg (VLAHOS, 1989; KANE et al., 1995). Estudos mais recentes mostram a ocorrência de “flares” com energias inferiores, com emissões térmicas (4-10 keV) e não térmicas (15-25 keV) em raios-X, denominados “microflares” (CHRISTE et al., 2009). De acordo com a definição de Hudson (1987), um “flare” solar é “uma perturbação transitória que ocorre na atmosfera solar”. Esta definição é extremamente abrangente, e até certo ponto, muito vaga, pois não considera as escalas temporais e espaciais envolvidas neste fenômeno.

Para Zirin (1988, p. 347), “um flare solar é um crescimento transitório na brilhância em  $H\alpha$ , com intensidade, no mínimo, duas vezes maior que a intensidade cromosférica, geralmente impulsivo e acompanhado de um crescimento em raios-X e fluxo em rádio frequências”.

O primeiro “flare” solar foi observado em luz branca em 1 de setembro de 1859, independentemente por Carrington e por Hudgson, que publicaram sua descoberta no MNRAS (HUDGSON, 1860; CARRINGTON, 1860 apud HUDSON, 1987; ZIRIN, 1988, p. 343).

A ocorrência dos “flares” solares se dá devido à conversão da energia magnética por reconexão das linhas de campo dos arcos magnéticos presentes nas configurações magnéticas complexas associadas às regiões ativas (MELROSE, 1993). E esta energia é liberada na forma de radiação eletromagnética em um vasto intervalo de comprimentos de onda, desde raios- $\gamma$  (com comprimentos da ordem de  $\text{\AA}$ ) e raios-X até ondas na faixa de rádio (com comprimentos de onda métricos e até quilométricos).

A Figura 2.4 mostra um diagrama da evolução temporal dos diferentes tipos de radiação eletromagnética associados a um “flare” solar.

Nem todos os “flares” solares apresentam uma assinatura em todos os comprimentos de onda, e também não apresentam variações na sua intensidade, mas geralmente a maioria dos “flares” mostra uma evolução bastante similar, constituída de três fases principais: fase precursora, fase impulsiva e fase gradual.

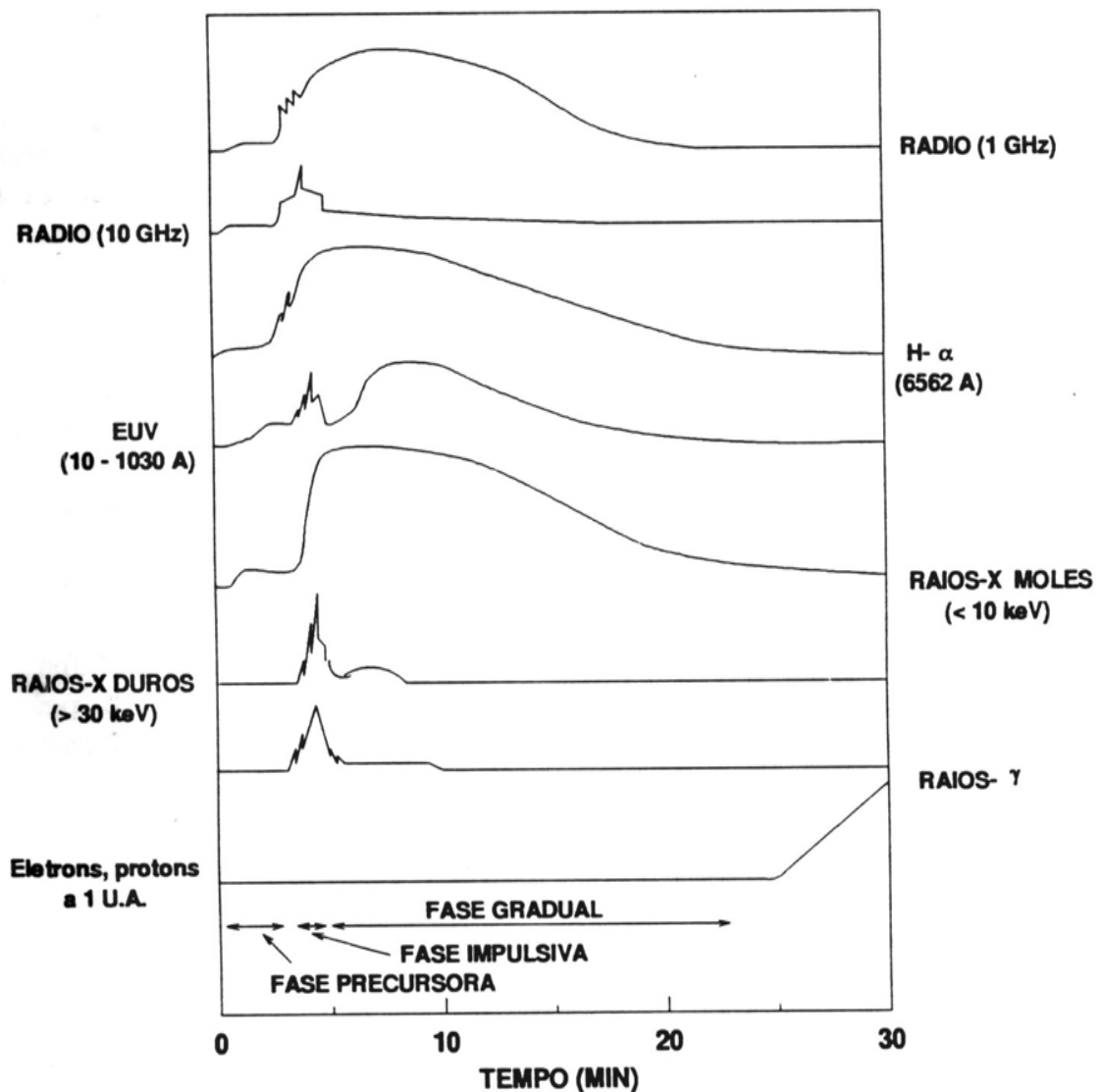


Figura 1.5 - Esquema representando a evolução de um “flare” solar típico em diferentes faixas do espectro eletromagnético (de ondas de rádio a raios-X e gama). O diagrama mostra as fases precursora, impulsiva e gradual.

Fonte: Adaptada de Svestka (1976, p.3).

### 2.2.1 Fases de um “flare” solar

Um “flare” solar típico apresenta 3 fases distintas: a fase pré-flare ou precursora, a fase impulsiva e a fase gradual ou extensa, como ilustrado na Figura 2.4, que mostra os perfis típicos da evolução de um “flare” solar em diferentes bandas do espectro eletromagnético.

A principal característica da chamada **fase precursora** é o aquecimento súbito de uma região restrita da atmosfera solar relacionada com regiões ativas. Isto ocorre porque o campo



magnético presente na região, geralmente caracterizado pelos arcos magnéticos, torna-se instável, possivelmente devido à dinâmica de as estruturas magnéticas e também devido ao surgimento de novas configurações que emergem das camadas subfostoféricas. Essa reorganização das configurações magnéticas acarreta uma dissipação de energia que levam ao aquecimento das regiões vizinhas (DULK, MCLEAN; NELSON, 1985; TANDBERG-HANSEN; EMSLIE, 1988).

A assinatura deste processo rápido de aquecimento é um pequeno aumento das emissões em H- $\alpha$ , raios-X moles e ondas de rádio na faixa de ondas centimétricas, com duração da ordem de apenas alguns minutos antes da ocorrência da fase impulsiva.

A **fase impulsiva** está presente em cerca de 90% dos “flares” solares e representa uma súbita liberação da energia magnética armazenada no campo magnético que permeia as regiões ativas. A energia liberada acarreta principalmente a aceleração de partículas, o aquecimento do plasma da atmosfera solar, a ejeção de matéria e o enriquecimento do campo de radiação. Esta fase tem uma duração variável, da ordem de alguns minutos (geralmente de 5 a 10 minutos).

Em decorrência desta energia liberada nesta fase, ocorre um grande aumento da intensidade da radiação emitida que pode ocorrer em praticamente todo o espectro eletromagnético, desde altas energias, como raios- $\gamma$  e raios-X duros, como também um aumento da emissão no EUV e no óptico, resultantes da resposta térmica da atmosfera aos processos de energização associados a esta fase, além de aumento da emissão em ondas de rádio (KANE et al., 1980; TANDBERG-HANSEN ; EMSLIE, 1988).

Durante a fase impulsiva, as partículas carregadas, como prótons e elétrons presentes na atmosfera solar podem ser acelerados. Devido à sua menor inércia e, portanto, maior mobilidade, os elétrons são acelerados a energias da ordem de cerca de até 200 keV ou mais (KUNDU, 1982). A presença desses elétrons acelerados pode gerar emissões rádio nas faixas de ondas métricas, decimétricas e centimétricas e também emissões em raios-X, por diversos mecanismos, como descrito nas seções a seguir.

A produção de emissões impulsivas em raios-X duros e em rádio frequências (emissões contínuas na faixa de microondas e emissões coerentes com estruturas finas nas faixas de ondas métricas e decimétricas) é uma indicação que sugere a presença de elétrons energéticos não térmicos na região dos “flares” (com energias da ordem de 10-200 keV, muito acima da

energia dos elétrons térmicos do meio). A aceleração de partículas do meio é o aspecto mais característico da fase impulsiva e corresponde a uma grande fração da energia total liberada durante o “flare” solar.

A **fase gradual**, como o próprio nome revela, é caracterizada por um aumento gradual da intensidade das emissões em diversos comprimentos de onda. Tal aumento da intensidade nesta fase é provavelmente causada pela liberação da energia depositada na plasma e nas partículas durante a fase impulsiva. E assim ocorre uma diminuição também lenta das emissões, depois devido à termalização dos elétrons energéticos que foram acelerados na fase impulsiva.

As partículas aceleradas na fase anterior atingem energias da ordem de MeV (STURROCK, 1980; KOSUGI; DENNIS; KAI, 1988) e a região perturbada pelo “flare” atinge sua maior área, principalmente em raios-X moles devido ao plasma aquecido confinado nos arcos magnéticos (KUNDU ; VLAHOS, 1982; MCLEAN, 1985).

### 2.2.2 Regiões de aceleração

A liberação de energia pelos "flares" solares acarreta principalmente a aceleração de partículas do meio, preferencialmente os elétrons e o aquecimento do plasma ambiente, que pode ocorrer no topo dos arcos magnéticos (HOLMAN, 1985; MASUDA et al., 1995) ou na zona de interação de arcos magnéticos distintos, em locais denominados de **regiões de aceleração**.

Uma parcela dos elétrons que são acelerados durante o “flare” fica aprisionada nas linhas de campo dos arcos magnéticos, descrevendo órbitas espirais e, conseqüentemente, emitindo radiação na faixa de ondas milimétricas e centimétricas, devido ao mecanismo girossincrotrônico (KUNDU, 1965).

A outra parcela dos elétrons acelerados escapa e se propaga com velocidades da ordem de 0,1-0,3 c (sendo c a velocidade da luz no vácuo), na forma de um feixe, ao longo das linhas do campo dos arcos magnéticos, podendo seguir dois caminhos: para as regiões superiores da atmosfera solar e para os pés dos arcos magnéticos.

Os feixes interagem com o plasma dos arcos magnéticos gerando emissão em ondas de rádio. Os feixes de elétrons que seguem pelas linhas de campo abertas em direção à alta coroa geram rádio emissões em ondas métricas (como emissões tipo III métricas) e aqueles que seguem pelas linhas de campo fechadas em direção à fotosfera geram emissões decimétricas (emissões tipo III decimétricas e suas variantes) (DULK, 1985).

Aschwanden (2002) apresenta uma descrição detalhada dos vários mecanismos de emissão em rádio frequências associados aos “flares”. Tais mecanismos de emissão em rádio foram revisados por Aschwanden (2004).

Neste trabalho, é discutido o mecanismo de emissão de plasma (Seção 2.5) responsável pelas emissões em rádio que ocorrem principalmente na faixa de ondas decimétricas, tais como explosões tipo III e suas variantes, entre as quais estão as explosões tipo U e tipo J, o principal objeto de estudo do presente trabalho.

Quando os feixes de elétrons mais energéticos (não térmicos) precipitam para os pés do arco magnético, na baixa cromosfera, e encontram densidades mais altas (superiores a  $10^{11} \text{ cm}^{-3}$ ) do plasma térmico, são geradas as emissões em raios-X duros pelo mecanismo bremsstrahlung de alvo espesso.

A Figura 2.5 mostra uma representação esquemática da geometria típica do cenário onde ocorre um “flare” solar.

### **2.3 Rádio emissões solares**

Desde a década de 1960, as observações solares realizadas na faixa de comprimentos de onda métricos, decimétricas e milimétricas têm contribuído para um melhor entendimento sobre aos “flares” solares e suas principais manifestações nesta faixa do espectro eletromagnético. Uma representação esquemática dos diversos tipos de emissões rádio, observadas na faixa de 10-30000 MHz, associadas à ocorrência de um “flare” solar é mostrada na Figura 2.6.

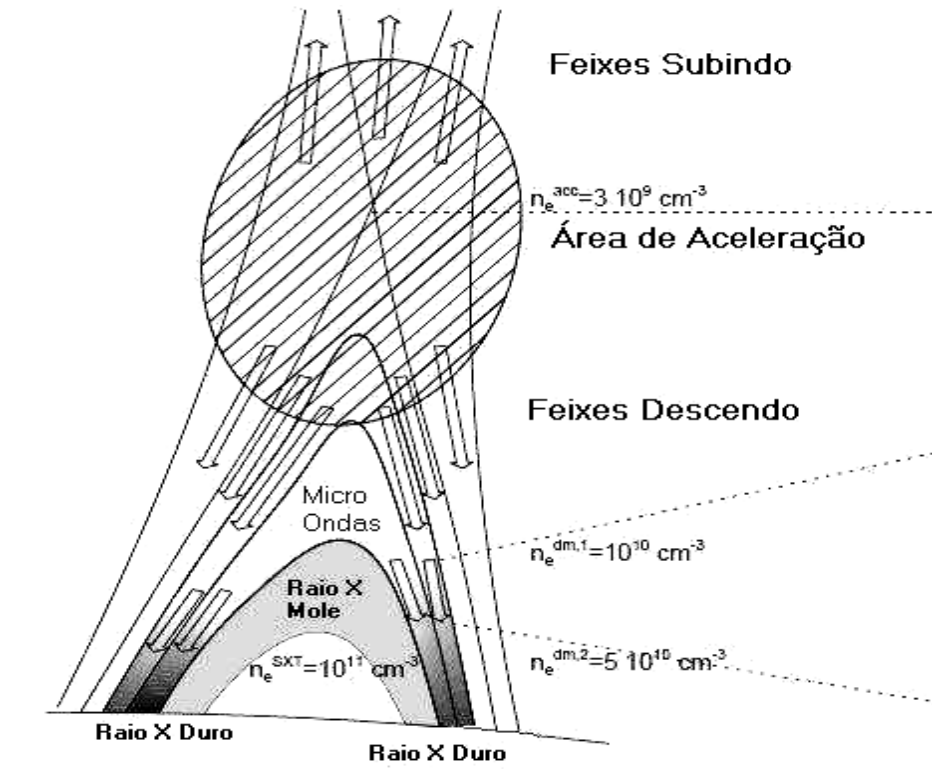


Figura 1.6 – Esquema representando a geometria típica do cenário onde ocorre um “flare” solar. Mostrado a região de aceleração, no topo do arco magnético, onde ocorre a reconexão magnética, os feixes de elétrons viajando rumo à coroa (feixe subindo) e à fotosfera (feixe descendo), e as regiões de emissão em raios-X moles e duros.

Fonte: adaptada de Aschwanden e Benz (1997).

Originalmente, a classificação das emissões em tipos I, II, III, IV e IV baseia-se em dados na faixa de ondas métricas, que representa a principal faixa de operação dos espectrógrafos solares em operação nas décadas de 1960 e 1970. Posteriormente, com os espectrógrafos solares operando em menores comprimentos de onda, nas faixas decimétrica e centimétrica, outras emissões foram identificadas. Por exemplo, emissões tipo III decimétricas e suas variantes. A seguir são apresentadas as características gerais das explosões em tipos I, II, III, IV e IV na faixa de ondas métricas (MCLEAN, 1985).

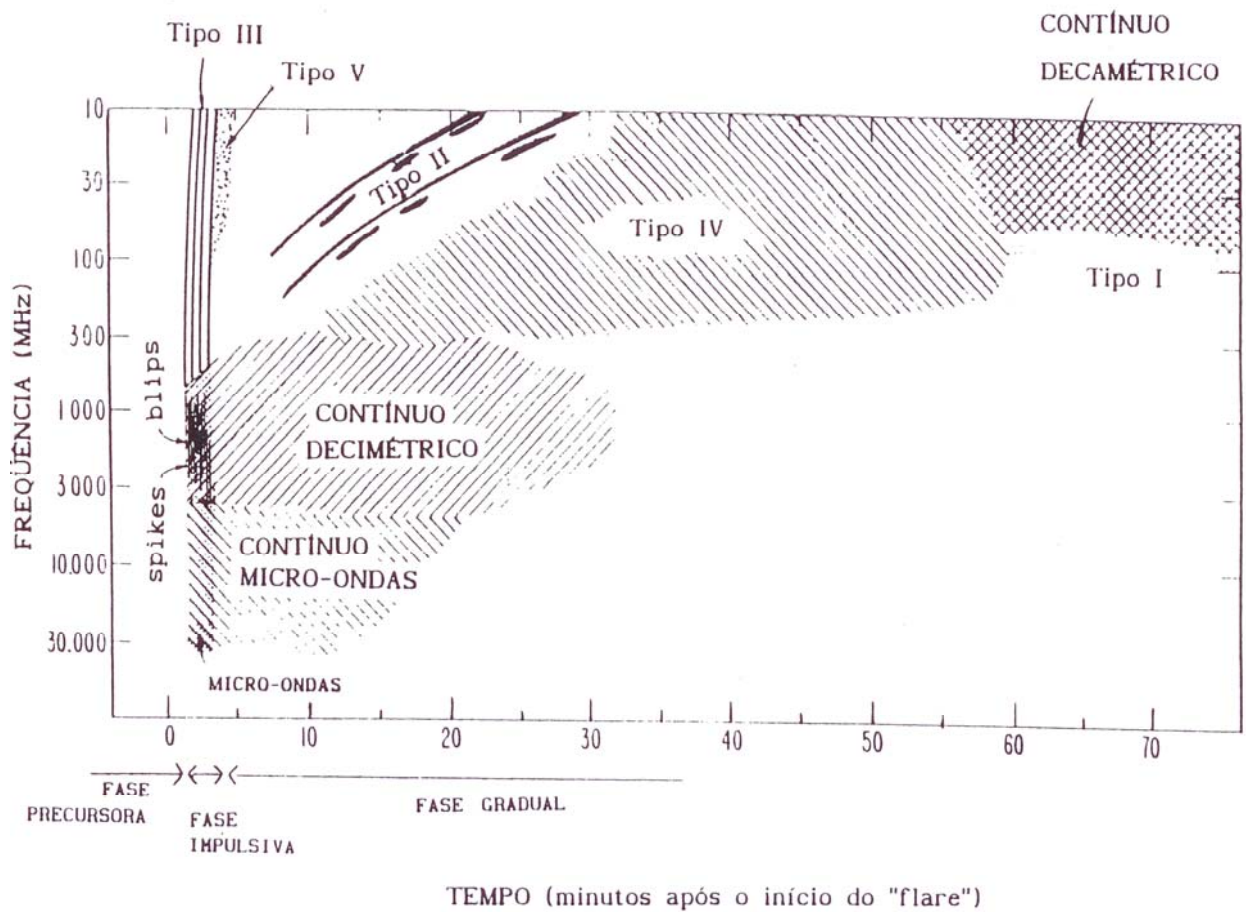


Figura 1.7 – Esquema com os diversos tipos de rádio emissões solares observadas no intervalo de rádio frequências entre 10 MHz e 30 GHz.

Fonte: Fernandes (1992), adaptada do SGD - Solar Geophysical Data (2001).

### 2.3.1 Explosões Tipo I

As explosões classificadas como tipo I apresentam banda estreita em frequência (da ordem de 2,5% da frequência de observação, isto é,  $\Delta f/f \approx 0,025$ ) e curta duração (da ordem de 1 segundo), que ocorrem devido à aceleração local dos elétrons até energias de algumas vezes a energia térmica e são acompanhadas por uma emissão contínua de banda larga (~ 50-100 MHz). O grupo de explosões tipo I, chamado de tempestades tipo I, tem duração total de horas ou até mesmo de dias, resultado provavelmente de processos de reconexão de linhas de campo magnético entre arcos magnéticos pré-existentes e arcos emergentes.

### **2.3.2 Explosões Tipo II**

As explosões tipo II são caracterizadas por apresentar um par de emissões harmônicas (no fundamental e segundo harmônico) com uma taxa de deriva em frequência lenta (geralmente inferior a 1 MHz/s). Apresentam largura de banda instantânea estreita (da ordem de MHz). A presença da deriva, orientada de alta para baixa frequência, está associada ao movimento de uma onda de choque se propagando para, fora gerada pela abrupta ejeção de matéria ou liberação de energia durante um “flare” solar. A emissão harmônica ocorre provavelmente devido à emissão de plasma dos elétrons acelerados dentro da frente de choque.

### **2.3.3 Explosões Tipo III**

As explosões tipo III na faixa de ondas métricas representam emissões intensas e com taxa deriva em frequência rápida (geralmente superior a 100 MHz/s), orientada de alta para baixa frequência. Comumente, ocorrem em grupos (com dezenas ou centenas explosões individuais), com duração total de minutos. As explosões tipo III são geradas pela interação de feixes de elétrons acelerados durante um “flare”, que viajam ao longo das linhas de campo magnético com velocidades sub-relativísticas (da ordem de 0,1-0,3 c), com o plasma térmico solar (o mecanismo de emissão de plasma é descrito na Seção 2.6).

### **2.3.4 Explosões Tipo IV**

As explosões tipo IV são divididas em dois grupos distintos: tipo IV estacionária e tipo IV não-estacionária.

A explosão classificada como estacionária representa uma emissão contínua intensa de banda larga que sucede um grande “flare” solar. Inicialmente, com poucas explosões que evolui posteriormente para uma tempestade tipo I, com a fonte estacionária. Nos estágios iniciais, o grau de polarização circular aumenta até próximo a 100%.

Por outro lado, uma explosão tipo IV não-estacionária, corresponde a uma fonte de emissão contínua em movimento, identificada como um plasmóide denso ejetado durante um “flare”, e que normalmente perde intensidade após percorrer cerca de 1 raio solar. A radiação emitida

pode ser gerada por emissão girossíncrotron de elétrons energéticos ( $\sim 100$  keV) na presença de um campo magnético intenso transportado pelo plasmóide em movimento ou pelo processo de emissão de plasma, similar ao gerador das explosões tipo III.

### **2.3.5 Explosões Tipo V**

As explosões tipo V são emissões contínuas, na faixa de frequências entre 10 e 100 MHz, com duração de cerca de 2 minutos, que ocorre durante ou logo após a um grupo de explosões tipo III. A longa duração das explosões tipo V provavelmente se deve ao espalhamento em ângulo de passo, que remove elétrons do feixe da explosão tipo III tornando sua propagação mais lenta. O grau de polarização circular geralmente é baixo e oposto ao das explosões tipo III precedentes, provavelmente devido à emissão de plasma de elétrons espalhados.

## **2.4 Emissões solares na faixa de ondas decimétricas**

Na faixa de ondas decimétricas, as emissões solares são geradas basicamente por dois processos: emissão de plasma e emissão girossincrotrônica em banda larga (emissão contínua) (PICK; KLEIN; TROTTEY, 1990; BASTIAN; BENZ; GARY, 1998).

No entanto, até então não era bem estabelecida e compreendida a associação entre a ocorrência das emissões solares em comprimentos de onda decimétricos e os processos de liberação de energia dos “flares”. Isso começou a mudar com os resultados das observações do satélite Skylab, que foi lançado em 14 de maio de 1973, com diversos instrumentos a bordo para monitorar o Sol em H-alfa, raios-X, ultravioleta, entre outros.

As observações do Skylab mostraram que as emissões em raios-X moles associadas aos “flares” solares ocorriam em regiões específicas da atmosfera solar. Os modelos de distribuição da densidade em função da altura na atmosfera solar indicam que tais regiões apresentam densidades eletrônicas da ordem de  $10^9$ - $10^{10}$   $\text{cm}^{-3}$ , sendo que este intervalo de densidade corresponde à densidade das regiões onde são geradas as emissões decimétricas.

Portanto, as observações resultaram em evidências de que as emissões solares detectadas na faixa de ondas decimétricas estão, de alguma forma, relacionadas à liberação primária de

energia durante a ocorrência dos flares solares, que resultam na aceleração das partículas e aquecimento do meio (MOORE et al., 1980).

Observações posteriores feitas através de imagens em raios-X de alta resolução do satélite Yohkoh confirmaram as evidências de que a liberação de energia dos flares ocorre geralmente em altitudes superiores a  $2 \times 10^4$  km acima da fotosfera solar, conforme publicado nos trabalhos de Ohyama e Shibata (1998; 1999). Portanto, pode-se afirmar que as observações solares realizadas na faixa de ondas decimétricas são muito importantes como ferramenta para diagnosticar e investigar as emissões relacionadas com a liberação de energia e a aceleração e propagação de partículas durante os “flares” solares.

#### **2.4.1 Estruturas finas na rádio emissão decimétrica**

O termo estrutura fina é utilizado para designar uma rádio-emissão cujos registro no espectro dinâmico apresenta banda estreita em frequência (largura de banda menor que 10% da frequência de observação, isto é,  $\Delta f/f < 0,1$ ) e/ou curta duração (inferior a 1 segundo). Alguns autores também incluem na definição o intervalo de temperatura de brilhância da explosão (entre  $10^8$  e  $10^{15}$  K). Portanto, pode-se ter uma estrutura fina em tempo e ou em frequência.

Alguns catálogos de emissões rádio em ondas decimétricas apresentando estruturas finas (em tempo e/ou frequência) já foram publicados. Dröge (1977) publicou um levantamento de estruturas finas, observadas na faixa de frequências entre 200 MHz e 1400 MHz. Güdel e Benz (1988) apresentaram um catálogo contendo explosões solares observadas pelo espectrômetro Phoenix na banda de frequência de 300-1000 MHz, no período de 1979 a 1987.

Allaart et al. (1990) apresentaram vários tipos de estruturas finas observadas até 4000 MHz. Tais estruturas finas foram denominadas de acordo com sua morfologia nos domínios temporal e espectral como “hands”, “dots”, “fringes”, entre outros tipos. Isliker e Benz (1994) apresentaram uma catalogação de emissões apresentando estruturas finas observadas entre 1 e 3 GHz pelo espectrômetro Phoenix.

Mais recentemente, Fu et al. (2004) publicaram um catálogo com observações de estruturas finas registradas na China pelo “Solar Broadband Radio Spectrometer” (SBRS) nas faixas 0,7-1,5 GHz, 2,0-7,6 GHz, 2,6-3,8 GHz e 4,5-7,5 GHz, entre 1996 e 2000.



Baseados nas observações de explosões solares realizadas pelo BSS foram publicados catálogos anuais de estruturas finas presentes nos espectros dinâmicos das explosões solares registrados na faixa de ondas decimétricas (1000-2500 MHz) nos anos de 1999 (FERNANDES, 2003a), 2000 (FERNANDES, 2003b), 2001 (FERNANDES, 2003c) e 2002 (FERNANDES, 2003d). Cabe ressaltar que a maioria dos catálogos anteriores publicados até a década de 1990 é baseada em observações realizadas com resolução temporal igual ou inferior a 100 ms, enquanto que as observações do BSS chegam à resolução de até 10 ms.

#### **2.4.2 Explosões tipo III e variantes**

O mecanismo de emissão para a faixa de ondas de rádio dominante das explosões registradas durante os “flares” solares depende dos comprimentos de onda observados e das condições locais da fonte das explosões.

Embora não seja uma regra, geralmente emissão girossíncrotron (gerada por elétrons aprisionados espiralando ao redor das linhas de campo magnético) domina a emissão em comprimentos de onda centimétricos e milimétricos e a emissão de plasma (gerada pela interação de feixes de elétrons acelerados com plasma ambiente) domina a rádio emissão em ondas métricas e decimétricas. No entanto, na faixa de frequências decimétricas também se pode observar emissões contínuas em banda larga (muitas vezes denominadas de microondas, geradas pelo mecanismo girossíncrotron).

As explosões tipo III são rádio emissões não-térmicas geradas pelo mecanismo de emissão de plasma, estando diretamente associadas a feixes de elétrons energéticos se propagando na atmosfera solar. As explosões tipo III ocorrem geralmente na faixa de 400 a 800 MHz (na faixa de ondas decimétricas), mas existem relatos de observações em frequências mais baixas, de até 200 MHz. Da mesma forma, existem observações com registro de emissões tipo III em intervalos de frequência muito mais altos entre 4,5 e 7,5 GHz (NING et al., 2005). As emissões tipo III registradas acima de 1 GHz geralmente são designadas como emissões tipo III-dcm (decimétricas). Em geral as explosões tipo III-dcm são mais numerosas do que as explosões tipo III métricas.

Os feixes de elétrons responsáveis pelas explosões tipo-III registradas em ondas métricas se deslocam em direção à alta coroa, geralmente ao longo das linhas abertas de campo

magnético. Por outro lado, as explosões tipo-III na faixa de ondas decimétricas, acima de 1 GHz, apresentam geralmente taxa de deriva em frequência inversa ("reverse slope" - RS), que caracteriza movimento descendente dos feixes de elétrons ao longo das configurações magnéticas fechadas em direção à fotosfera solar (SAWANT; FERNANDES; NERY, 1994; MELÉNDEZ MORENO et al., 1999; CECATTO et al., 2003; MÉSZÁROSOVÁ et al., 2008). A mudança de movimentos ascendentes e descendentes ocorre geralmente na faixa de 0,4-1,0 GHz.

Nas últimas décadas, as explosões tipo III decimétricas têm sido investigadas, principalmente na faixa de frequência 1000-3000 MHz (ASCHWANDEN et al., 1985; FERNANDES, 1992; SAWANT; FERNANDES ;NERI, 1994; ISLIKER; BENZ, 1994; ASCHWANDEN et al., 1995; FERNANDES; SAWANT, 1996; MELÉNDEZ MORENO, 1997; MELÉNDEZ MORENO et al., 1999), mas também em ondas centimétricas entre 3100 e 5200 MHz (STHÄLI; BENZ, 1987) ou mesmo até 8400 MHz (BENZ et al., 1992).

Meléndez Moreno et al. (1999) mostraram que a duração típica das explosões tipo III decimétricas é cerca de 300 ms ou inferior e a banda em frequência é da ordem de 100 a 250 MHz. Portanto, as observações destas estruturas finas com resolução temporal superior ou igual a 100 ms não possibilitam a determinação precisa das características temporais, o que justifica a análise de estruturas finas baseadas em dados de observações acima de 1000 MHz com resoluções inferiores a 100 ms, como as registradas pelo BSS.

Diversas estruturas finas que apresentam aspectos morfológicos semelhantes às explosões tipo III são muitas vezes designadas como variantes de tipo III, ou simplesmente tipo III-like. Apesar das ligeiras diferenças morfológicas, são geradas pelo mesmo mecanismo de emissão de plasma. Esse é o caso das emissões chamadas de tipo U, tipo N e tipo J.

Entre as variantes das emissões tipo III também estão as emissões em banda estreita, inicialmente chamadas de "blips", observados pela primeira vez por Benz et al. (1981). Foram registradas também na faixa de (600-1000) MHz (BENZ et al., 1983), em 1600 MHz (SAWANT et al., 1987; SAWANT et al., 1990) e até 4000 MHz por Allaart et al. (1990).

As emissões tipo "blips" foram posteriormente incorporadas a uma única categoria denominada genericamente de emissão decimétrica tipo III (tipo III-dcm), que engloba as emissões de plasma causadas por feixe de elétrons energéticos e podendo apresentar largura de banda estreita (III-nb), intermediária (III-ib) ou longa (III-bb).

Explosões tipo III-dcm e algumas variantes foram investigadas a partir de dados espectroscópicos na faixa de frequências decimétricas por Fernandes (1992), Sawant et al. (1994), Fernandes e Sawant (1996), Fernandes, (1997), Fernandes, Melendez Moreno e Sawant (1998), Meléndez Moreno et al. (1999) e, mais recentemente, por Cecatto et al. (2003) e Mézsárosóvá et al. (2008a).

### **2.4.3 Explosões tipo U / U invertido**

Emissões rádio denominadas tipo U invertido (ou simplesmente tipo U) são devido à sua morfologia presente nos espectros dinâmicos, nos quais a taxa de deriva em frequência varia gradualmente de negativa (de alta para baixa frequência) para positiva, passando pela deriva nula, na chamada frequência de retorno ou inversão (“turning frequency”).

As emissões tipo U são principalmente observadas em baixas frequências, em comprimentos de ondas métricos e decamétricos (STONE, FAINBERG, 1971; KARLICKÝ, TLAMICHA, 1976). Na faixa decimétrica, observações de emissões tipo U foram relatadas por diversos autores (YAO et al., 1997a; 1997b; GÜDEL; BENZ, 1988; ASCHWANDEN et al., 1992; AURASS et al., 1994; AURASS; KLEIN, 1997; WANG et al., 2001a; CECATTO et al., 2002; DUTRA; GUARNIERI; FERNANDES., 2008).

A banda de frequência mais alta para a qual foram observadas emissões tipo U é de 2,6-3,8 GHz (WANG et al., 2001a). Através da análise de emissões tipo U, é possível determinar características da geometria dos arcos magnéticos (ASCHWANDEN et al., 1992; YAO et al., 1997a; 1997b; WANG et al., 2001a). Análises preliminares das emissões tipo U, registradas pelo BSS na faixa decimétrica foram relatadas no trabalho de Dutra, Guarnieri e Fernandes (2008).

As emissões tipo U têm sido interpretadas como emissão de plasma gerada por elétrons acelerados durante “flares” solares e viajando ao longo das estruturas magnéticas fechadas (“loops”) na cromosfera e na baixa coroa solar, semelhantes às emissões tipo III e tipo J, presentes na radio emissão solar (WILD; SMERD; WEISS. 1963; FOKKER, 1970; ASCHWANDEN et al., 1994). No entanto, a taxa de ocorrência das explosões tipo U é pequena, principalmente se comparada à das explosões tipo III típicas (SUZUKI; DULK, 1985).

### **2.4.3 Explosões tipo J, tipo N e tipo M**

Dependendo da morfologia apresentada nos espectros dinâmicos em rádio, as estruturas finas podem ser classificadas com diferentes nomenclaturas. Por exemplo, as estruturas finas denominadas tipo J (ou J invertido), são variantes de uma emissão tipo U, com interrupção da emissão no ramo descendente (consequência da perda de energia dos elétrons do feixe emissor antes de percorrer a porção descendente do arco magnético) (FOKKER, 1969).

Uma outra variante das emissões tipo U é denominada tipo N, na qual a morfologia apresenta um ramo adicional aos de uma explosão tipo U típica. Karlický et al. (1996) relataram um modelo numérico para explicar a morfologia tipo N apresentada nos espectros de rádio emissão. Ning et al. (2003) apresentaram observação de uma “sub-classe” de emissão tipo III, em frequência em torno de 6 GHz, a qual denominaram de emissão tipo N-parcial. Além disso, a combinação de duas emissões tipo U consecutivas é denominada explosão tipo M. Emissões tipo N e tipo M foram relatadas por Wang et al. (2001b). Xu et al. (2001) apresentaram explosões com morfologia semelhante na faixa de frequência de 4,5 – 7,5 GHz.

Apesar de uma interpretação comum, o registro das emissões tipo U ou tipo J e tipo N é consideravelmente muito mais raro do que o das emissões tipo III, especialmente nas faixas milimétricas e decimétricas. Porém esta baixa frequência de ocorrência é inesperada, considerando a grande ocorrência de estruturas magnéticas fechadas em latitudes relativamente baixas na atmosfera solar. Além disso, as emissões tipo U geralmente apresentam assimetria em frequência, sendo o ramo ascendente geralmente mais alargado que o ramo descendente (YAO et al., 1997a; 1997b).

## **2.5 Emissão de Plasma**

Do ponto de vista teórico, o processo de emissão de plasma, responsável pelas explosões tipo III e suas variantes, pode ser definido como “qualquer processo de emissão no qual a energia associada às oscilações de plasma é parcialmente convertida em energia na forma de radiação eletromagnética, que é liberada”.

Shklovsky (1946, apud MELROSE, 1985) e Martyn (1947, apud MELROSE, 1985) foram os primeiros a sugerir, na década de 1940, que as explosões solares detectadas em ondas de rádio eram geradas devido às ondas de Langmuir<sup>2</sup>, então denominadas de oscilações de plasma. As ondas de Langmuir são geradas por instabilidade de feixes de partículas energéticas, como os elétrons acelerados durante os “flares” solares.

O termo “emissão de plasma” foi introduzido por Wild (1950 apud MELROSE, 1985), porém os detalhes de como as ondas de Langmuir se propagavam e os processos de emissão não eram na época bem conhecidos. Ginzburg e Zheleznyakov (1958, apud MELROSE, 1985) foram os primeiros a elaborar um modelo para as explosões solares tipo III baseado no mecanismo de emissão de plasma, posteriormente aperfeiçoado por diversos autores (ZHELEZNYAKOV; ZAITSEV, 1970; GOLDMAN, 1983; MELROSE, 1985). Cabe mencionar que outros mecanismos também têm sido propostos (ABALDE et al., 1998).

Pelo mecanismo de emissão de plasma, as explosões tipo III e suas variantes (como as explosões tipo “blips”, tipo U, tipo J, etc.) são geradas por feixes de elétrons de baixa energia acelerados durante os “flares” solares, se propagando ao longo das linhas de campo magnético. A interação do feixe de elétrons com o plasma ambiente gera ondas de Langmuir de grande amplitude, as quais produzem ondas eletromagnéticas na frequência de plasma local e segundo harmônico através de processos de espalhamento.

As ondas de Langmuir (ondas longitudinais) amplificadas podem ser convertidas em ondas de rádio (ondas transversais) por dois processos distintos: a) pelo espalhamento por íons térmicos ou por ondas de baixa frequência (como ondas de Alfvén e/ou ondas acústico-iônicas); neste caso a radiação emitida ocorre numa frequência próxima à frequência de plasma; e b) pela

---

<sup>2</sup> Ondas de Langmuir: são oscilações de plasma, cuja frequência de oscilação é igual à frequência de plasma e depende apenas da densidade do plasma local. O feixe de elétrons energéticos que interage com o plasma ambiente da atmosfera solar é considerado uma perturbação. Os elétrons do plasma são deslocados de sua posição de equilíbrio em relação aos íons do plasma, 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 do plasma recebe o nome de ondas de Langmuir (CHEN, 1983).

coalescência com ondas de Langmuir de sentido oposto; neste caso a radiação é gerada numa frequência próxima à frequência no segundo harmônico. Um diagrama de blocos mostrando as principais fases deste processo para geração de rádio-emissão pelo mecanismo de emissão de plasma é apresentado na Figura 2.7.

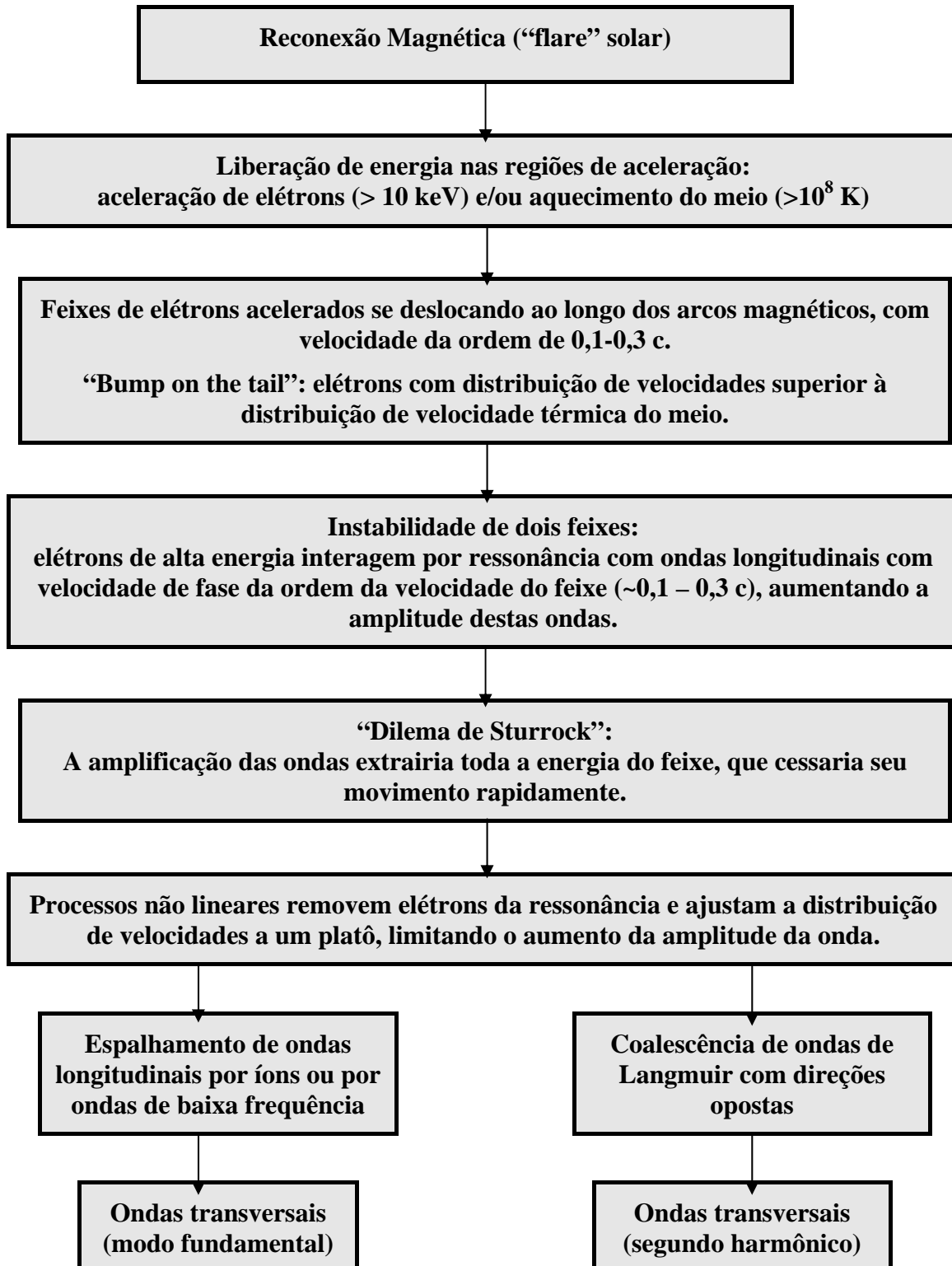


Figura 1.8 - Diagrama de blocos representando as diversas etapas do processo de emissão de plasma (para elétrons acelerados durante um “flare” solar).

Fonte: adaptada de Melrose (1985), p. 187.

## **2.6 Geometria magnética da região de aceleração**

Os principais modelos para os “flares” solares (e vários processos para ejeções coronais de massa – CMEs) estão, de alguma forma, relacionados com processos de reconexão magnética, na baixa coroa, nas denominadas regiões de aceleração. A grande quantidade de energia liberada nestes eventos impulsivos (na forma de radiação em diversos comprimentos de onda) ocorre pela conversão da energia magnética armazenada nos “loops”. Aschwanden (2004) discute diferentes modelos de “flares” solares. O que diferencia os diversos modelos é principalmente a geometria (topologia) do campo magnético.

Evidências observacionais da reconexão magnética como causa da liberação de energia durante os “flares” solares foram obtidas pelo satélite Yohkoh, com imagens em raios-X duros de estruturas tipo cúspide no topo de arcos magnéticos (TSUNETTA et al., 1992; MASUDA et al., 1994; MASUDA et al., 1995). Uma revisão dos trabalhos apresentando evidências observacionais da reconexão magnética nos “flares” pode ser obtida em Aschwanden (2004).

Imagens obtidas pelo satélite TRACE (“Transition Region and Coronal Explorer”) mostram que a configuração magnética nas regiões ativas é bastante complexa, com vários arcos magnéticos em interação, como ilustrado na Figura 2.8.

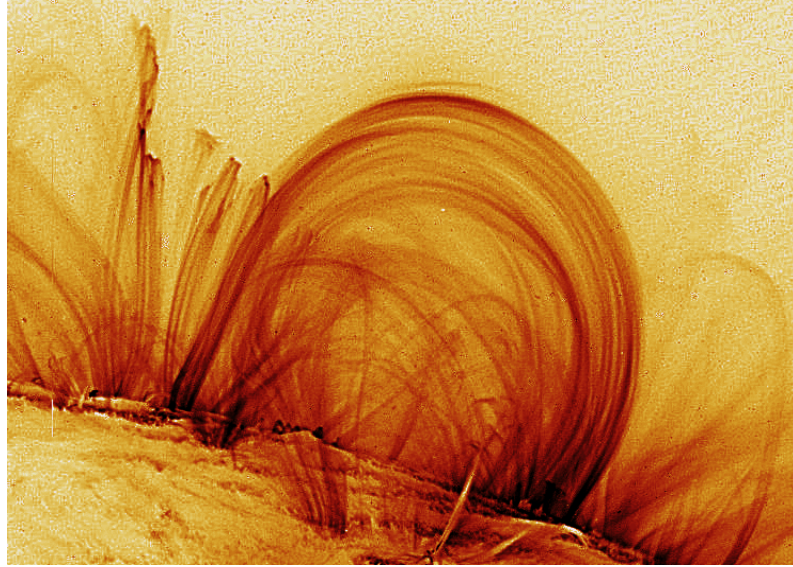


Figura 1.9 – Imagem de arcos coronais localizados no limbo solar obtidas pelo satélite TRACE, em 6 de Novembro de 1999 (02:30 UT), no ultravioleta (em 171 Å), cuja emissão é característica para plasmas de 1 MK.

Fonte: TRACE homepage: <http://soi.stanford.edu/results/SolPhys200/Schrijver/TRACEpodarchive.html>.

Vlahos (1990) já havia sugerido a existência de múltiplos arcos numa grande variedade de possíveis configurações magnéticas presentes nas regiões ativas. Neste cenário, os movimentos convectivos do plasma subfotosférico seriam os responsáveis pelas torções e estiramentos dos tubos de fluxo magnético, favorecendo a interação e a reconexão entre as linhas de campo magnético. A Figura 2.9 mostra exemplos de diferentes configurações magnéticas possíveis presentes em regiões ativas.

Evidências da localização da região de aceleração também foram obtidas através da determinação da energia associada aos feixes de elétrons emissores de tipo III-RS-dcm e emissões em raios-X duros, mostram que as regiões de aceleração estão localizadas em alturas de cerca de  $2,5 \times 10^9$  a  $7,0 \times 10^9$  cm acima da fotosfera solar (FERNANDES, 1997; FERNANDES et al., 1998; FERNANDES et al., 2000b).

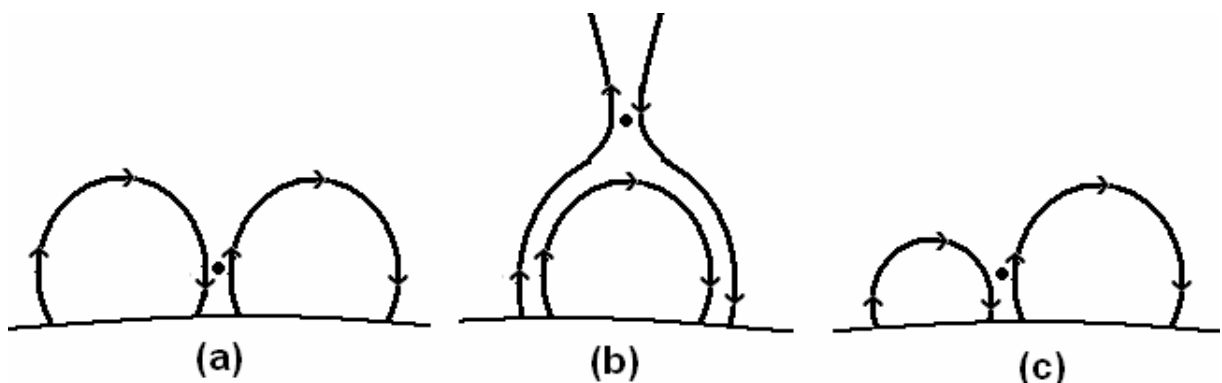




Figura 1.10 – Esquemas de configurações para o mecanismo de reconexão magnética entre linhas de campo de arcos magnéticos: (a) configuração tipo X, gerada pela aproximação de duas regiões ativas; (b) configuração tipo Y, reconexão entre linhas de campo abertas e fechadas numa região ativa bipolar; e (c) reconexão entre um arco emergente e um pré-existente com polaridades opostas.

Fonte: Fernandes (1992).

Evidências também foram obtidas a partir da observação de explosões tipo III-like bidirecionais (ASCHWANDEN et al., 1995; ROBINSON; BENZ, 2000), com deriva oposta, que indicam a transição entre os regimes de feixes movendo-se para cima e para baixo (ASCHWANDEN et al., 1995; MELÉNDEZ MORENO, 1997; MELÉNDEZ MORENO et al., 1999).

Conforme já mencionado, a liberação de energia magnética nas regiões de aceleração que ocorrem durante os “flares” solares provoca aceleração de partículas do meio, particularmente elétrons, caracterizando feixes de elétrons, que podem apresentar velocidades orientadas para cima ou para baixo, ao longo das estruturas magnéticas dos arcos, produzindo, respectivamente, emissões rádio com taxa de deriva em frequência normal ou invertida (“reverse slope” - RS). Dependendo da geometria magnética na qual os feixes de elétrons acelerados são injetados são produzidas emissões rádio como emissões tipo U, tipo J, podem ser produzidas. (ASCHWANDEN et al., 1994).

A Figura 2.10 mostra uma representação esquemática da relação entre a geometria da configuração magnética das regiões de aceleração e a morfologia observada nos espectros dinâmicos das emissões rádio solares.

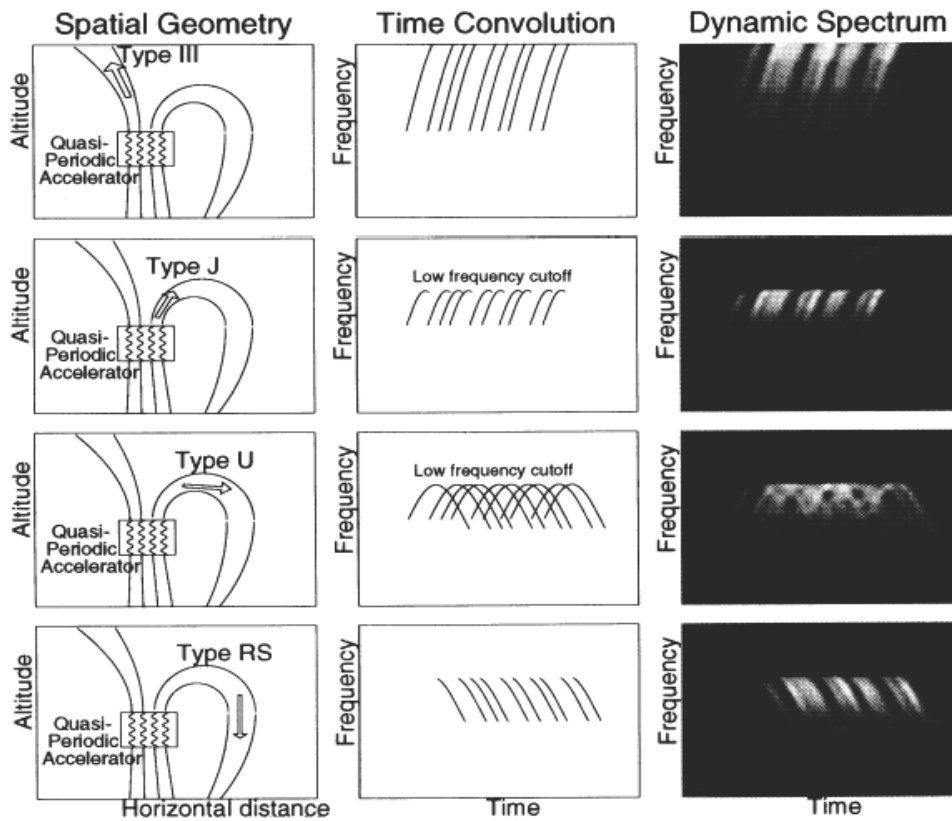


Figura 1.11 – (Esquerda) Representação da configuração magnética de arcos interagindo nas regiões de aceleração. (Direita) Respective espectros dinâmicos das emissões rádio geradas por feixes de elétrons acelerados nas linhas de campo magnético abertas ou fechadas, correspondente às diferentes configurações magnéticas.

Fonte: Adaptada de Aschwanden et al. (1994).

Pela análise de emissões apresentando nos espectros dinâmicos morfologia tipo “U”, “J”, ou como reportado mais recentemente, tipo “N”, é possível caracterizar a geometria magnética da região explosiva, através da morfologia mostrada na estrutura fina (vide Figura 2.10) e estimar parâmetros das regiões de aceleração, como temperatura e intensidade do campo magnético, como proposto neste trabalho.

### 3 INSTRUMENTAÇÃO

#### 3.1 O Brazilian Solar Spectroscope (BSS)

O Rádio Espectrógrafo Solar do INPE, posteriormente batizado de “Brazilian Solar Spectroscope” (BSS), foi desenvolvido em duas etapas. Na primeira etapa do projeto, a partir do ano de 1990, a antena parabólica de 9 metros de diâmetro, com um alimentador de banda estreita (operando na faixa de frequência de  $1600 \pm 100$  MHz), foi instalada no campus do INPE, em São José dos Campos (SAWANT ; ROSA, 1990).

Nesta fase, a aquisição dos dados obtidos pelo instrumento era analógica. Os espectros das observações eram registrados em filme fotográfico (preto e branco). Além disso, havia um registro em papel do sinal de integrado em um canal de frequência para monitoramento do funcionamento do instrumento, principalmente do rastreamento da antena.

A partir do ano de 1992 foi iniciada a aquisição digital dos dados, inicialmente com apenas 8 canais de frequência. Mesmo nesta etapa com as constantes reformulações e testes do instrumento, até o final de 1994, foram realizadas mais de mil horas de observação solar e foram registrados mais de 300 grupos de explosões solares (FERNANDES, 1992, SAWANT et al., 1993).

A segunda etapa do projeto foi iniciada no ano de 1995, com a troca do alimentador de banda estreita por um alimentador do tipo log-periódico de banda larga, que incluiu também a modificação de todo equipamento para operação na faixa de frequências de 200-2500 MHz.

Este espectrógrafo de banda larga entrou definitivamente em operação em maio de 1996. Inicialmente as observações foram realizadas principalmente para testar o funcionamento de todo o sistema, incluindo testes do novo sistema para a aquisição digital dos dados e também aquisição do sinal de tempo do GPS, fornecido na época pelo Centro de Controle de Satélites (CCS) do INPE. Este instrumento com a nova configuração é que foi então designado com o nome de “Brazilian Solar Spectroscope” (BSS).

A partir do ano de 1998, as observações solares sistemáticas (diárias) com o BSS foram iniciadas (FERNANDES, 1997; SAWANT et al., 1996; 2001). O Instrumento passou a operar em banda larga (1000 - 2500 MHz), com alta resolução espectral (3 - 10 MHz) e alta

resolução temporal (20 - 1000 ms) e visualização em tempo real dos dados digitalizados em até 100 canais de frequência (SAWANT et al., 2000).

Os programas BSSView (FARIA, 1999) e BSSDATA (MARTINON, 2003), para visualização e análise preliminar de dados espectrais do BSS, foram desenvolvidos por membros do grupo de Física do Meio Interplanetário (FMI) e desde então, têm sido aprimorados.

Em 2009, foi finalizado o projeto de modernização do sistema de aquisição do BSS (SAWANT et al., 2009), através de um projeto aprovado pelo CNPq. Neste projeto de atualização do sistema de aquisição digital foi realizada a troca de placa de digitação e adaptação do programa de aquisição de dados (USB que digitaliza os dados com 14 bits a uma taxa de 48 Kbits/s). Isso permitiu ampliar o número de canais em frequência para 200.

Além disso, como parte da revitalização, a antena de 9 metros, a torre e o sistema mecânico foram desmontados e atualmente estão passando por trabalhos de manutenção na empresa Harald de Curitiba (fabricante da antena). Depois de terminada a restauração da antena e das partes mecânicas, o instrumento será então instalado no campus do INPE em Cachoeira Paulista. Detalhes do novo sítio do BSS são fornecidos por Cecatto et al. (2010).

### **3.2 Descrição e características do BSS**

O BSS é o único espectrógrafo dedicado às observações solares na faixa decimétrica, com alta resolução e alta sensibilidade em operação na América Latina. O BSS opera na faixa de (1000 – 2500) MHz em conjunto com a antena parabólica de 9 metros de diâmetro, mostrada na Figura 3.1 (FERNANDES, 1997; SAWANT et al., 2001).

A Tabela 3.1 apresenta as principais características do instrumento. Pela Tabela pode-se verificar que o BSS é dotado resolução espectral e temporal que possibilita o registro de estruturas finas em rádio emissão decimétrica (FERNANDES et al., 2000a).



Figura 3.1 - Antena de 9 metros de diâmetro do BSS instalada no campus do INPE, em Cachoeira Paulista/SP.

Tabela 3.1 - Principais características do BSS

Antena /Montagem	9 metros / polar
Alimentador	log-periódico cruzado
Faixa de frequências	1000-2500 MHz
Resolução temporal	10 , 20 , 50 , 100 , 500 ou 1000 ms
Resolução espectral	3 MHz
Precisão de tempo absoluto	3 ms
Sensibilidade	~2-3 s.f.u.
Número de canais	25 ou 50 ou 100 ou 200
Visualização	tempo quase real
Campo de visada	todo o disco solar
Intervalo de observação	11:00-19:00 UT

A Figura 3.2 mostra o diagrama de blocos representando o novo sistema de recepção e aquisição de dados do BSS (SAWANT et al, 2009).

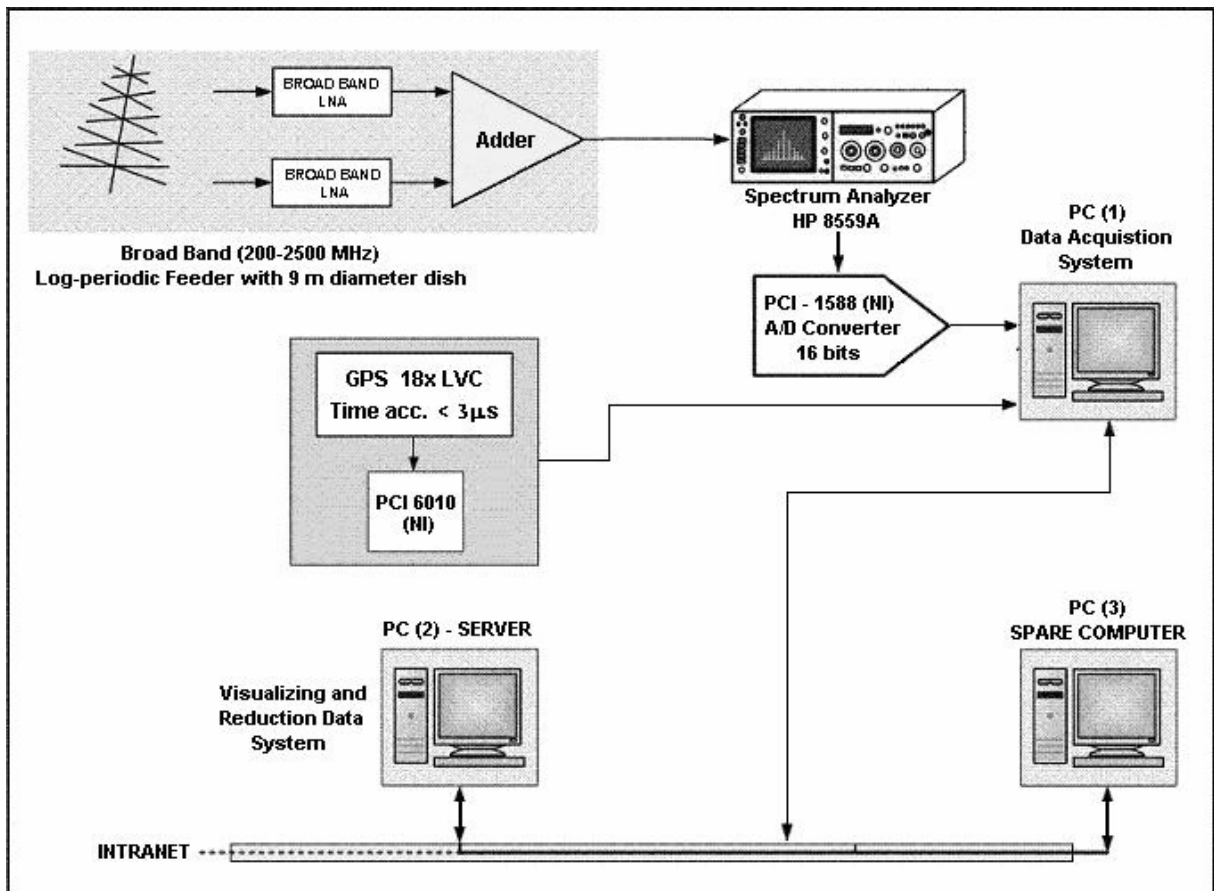


Figura 3.2 - Diagrama de blocos representando o “Brazilian Solar Spectroscope”.

Conforme mostrado na Figura 3.2, os dados coletados pelo alimentador tipo log-periódico são inicialmente amplificados pelo circuito LNA (“low noise amplifier”) instalado no próprio foco da antena de 9 metros. Os sinais amplificados são então somados (pelo “adder”) e enviados por cabo para o analisador de espectros, que faz o papel de receptor do espectrógrafo.

Os dados provenientes do analisador de espectros, que faz a varredura do sinal na faixa de frequências e com as resoluções selecionadas, são digitalizados no microcomputador IBM-PC1, que recebe também o sinal de GPS, que é gravado junto com os dados. Posteriormente, os dados digitalizados são enviados a um segundo micro-computador IBM-PC2, onde são visualizados na forma de espectro dinâmico, em tempo quase real e são armazenados para posterior análise. Cada arquivo gravado corresponde a 5 minutos de observação.

Os dados adquiridos pelo BSS são armazenados em arquivos binários, em um formato próprio com a extensão ESP. Cada arquivo de dados é constituído de duas partes:

- i) cabeçalho: onde são armazenadas informações referentes à aquisição: nome do arquivo, data de aquisição, tempo inicial da aquisição, tempo final da aquisição, faixa de frequência, resolução temporal, número de canais e número de varreduras;
- ii) matriz de dados: onde são armazenados os dados digitalizados (canal  $\times$  varredura) em unidades arbitrárias.

O monitoramento da atividade solar com o BSS é feito diariamente durante cerca de 8 horas (11 - 19 UT) o que gera um volume de cerca de 120 Mbytes de dados diários. Para reduzir o volume de dados armazenados, é feita uma triagem inicial dos dados e uma seleção de arquivos que realmente contém dados de explosões solares. Estes dados são então armazenados. Existem planos de criação de um banco de imagens (espectros dinâmicos) a partir dos dados de explosões solares do BSS, com recursos de busca via Internet.

Os principais aspectos operacionais do BSS são:

- a) visualização dos dados em tempo quase real na forma de espectro dinâmico (imediatamente após a aquisição de cada arquivo de 5 minutos de observações, o espectro dinâmico correspondente é visualizado), o que possibilita mudar os parâmetros observacionais durante as observações, de acordo o interesse dependendo da atividade solar registrada, sem ter que esperar o final das observações;
- b) flexibilidade na escolha dos parâmetros observacionais, como as resoluções temporal e espectral e da banda de frequências de observação, dependendo dos objetivos das observações e da sensibilidade desejada;
- c) precisão de tempo absoluta da ordem de 3 milissegundos, o que possibilita estudos multi-espectrais a partir de dados de observação simultâneas realizadas por outros observatórios; e
- d) único espectrógrafo digital do hemisfério ocidental Sul com observações solares na faixa de ondas decimétricas, além de preencher com exclusividade uma lacuna no monitoramento contínuo do Sol, devido à sua localização entre as longitudes da Europa e da América do Norte.

### 3.3 Programas de visualização e tratamento de dados

Para visualização e análise de dados espectrais digitais do BSS é utilizado um programa desenvolvido na linguagem IDL (“Interactive Data Language”) batizado de BSSView (FARIA, 1999). Este programa permite visualizar o espectro dinâmico das observações e obter representações gráficas dos dados digitalizados (visualização de perfis temporais de múltiplos canais de frequência, selecionáveis entre 1 e 100 canais, visualização de imagens em escalas de cores e mapas de contorno e geração de figuras no formato “bmp”).

Para complementação da determinação de parâmetros das observações, é utilizado um outro programa em linguagem C++ padrão, batizado de BSSData (MARTINON, 2003). O BSSData apresenta ferramentas para destacar as explosões, determinar visualmente os parâmetros das explosões, manipular as cores do espectro dinâmico e para organizar os dados em projetos distintos. A Figura 3.3 mostra a tela de visualização do BSSData.

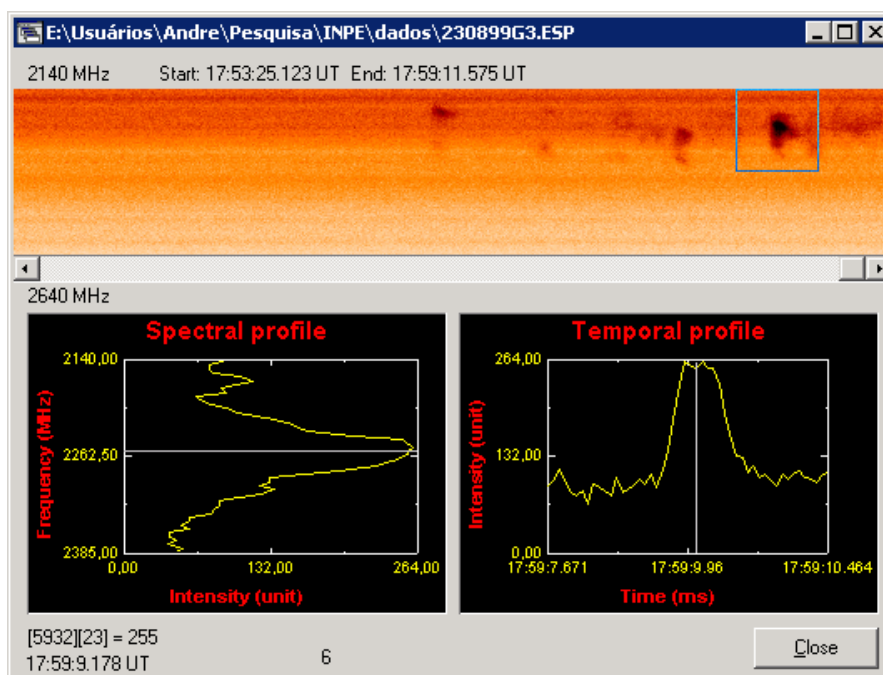


Figura 3.3 - Exemplo de tela do BSSData para visualização de um espectro dinâmico gerado a partir dos dados do BSS. Na tela é possível visualizar os perfis temporal e espectral de uma janela selecionada do espectro.

Fonte: Martinon (2003).



## 4 SELEÇÃO E ANÁLISE DAS EXPLOSÕES TIPO U E J DECIMÉTRICAS

### 4.1 Seleção das explosões solares tipo U e tipo J

Desde que o BSS entrou em operação regular, em 1998, foram registradas mais de 400 emissões rádio solares, apresentando várias estruturas finas. Foi realizada uma minuciosa busca e identificação de estruturas finas apresentando morfologia compatível com as explosões tipo U ou tipo J nos catálogos de espectros dinâmicos<sup>3</sup> do BSS (FERNANDES, 2003a; 2003b; 2003c; 2003d) e no banco de dados das explosões registradas até 2005<sup>4</sup>.

Conforme mencionado anteriormente, as explosões tipo U e tipo J, apesar de geradas pelo mesmo mecanismo de emissão de plasma, são muito mais raras que as explosões tipo III. Desta forma, foram selecionadas para análise apenas 5 estruturas finas com morfologia tipo U ou tipo J (mensurável dentro da faixa de frequência de observação). As explosões selecionadas foram registradas pelo BSS entre 1999 e 2001, durante ciclo solar #23.

A Tabela 4.1 apresenta as explosões tipo U e tipo J selecionadas para a análise. Outras explosões com morfologia semelhante foram descartadas, pois não possibilitavam a determinação dos parâmetros necessários para a análise proposta neste trabalho.

---

<sup>3</sup> Um espectro dinâmico é o registro de uma rádio-emissão em tempo  $\times$  frequência  $\times$  intensidade. 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), conforme mostrado na Figura 2.3. Assim, para as emissões rádio representadas em espectros com o eixo de frequência invertido, fica mais evidente o deslocamento da fonte na atmosfera solar, associado a deriva em frequência mostrada no espectro.

<sup>4</sup> Entre 2006 e 2008, o BSS não registrou explosões solares, devido à baixa atividade solar e a partir de 2007 teve início o projeto de recuperação e transferência do instrumento para o novo sítio no campus do INPE, em Cachoeira Paulista.

Tabela 4.1 – Explosões tipo U e tipo J selecionadas para a análise

Nº	Data	Horário de início (UT)	Morfologia
1	06/06/2000	16:28:00	U
2	12/12/2000	14:43:14	U
3	07/06/2001	16:11:38	J
4	22/08/2001	15:14:22	J
5	25/10/2001	15:13:18	U

## 4.2 Explosões tipo U e tipo J selecionadas e atividade solar associada

As subseções a seguir apresentam as principais características de cada uma das explosões selecionadas e a respectiva atividade solar associada. Ressalta-se que para todos os espectros dinâmicos gerados, foi aplicado o procedimento de subtração do ruído de fundo médio (“background”), com o intuito de homogeneizar o nível do sinal de fundo, principalmente minimizar os sinais de interferência eventualmente detectados.

### 4.2.1 Explosão tipo U de 06 de junho de 2000 (Nº1)

Em 06 de junho de 2000, o BSS registrou atividade solar intensa, com diversas emissões rádio registradas no intervalo de frequência de (1200 – 1700) MHz, entre elas uma explosão com morfologia tipo U, registrada às 16:28 UT (horário de início). As explosões registradas pelo BSS estão distribuídas em dois picos bem definidos de rádio-emissão (15:21 UT e 16:42 UT). O primeiro pico está correlacionado com um “flare” em raios-X classificado como X2.3<sup>5</sup>,

---

<sup>5</sup> A intensidade de um “flare” em raios-X é medida em unidades de potência por área ou Watts por metro quadrado. A classificação é feita por uma letra (A, B, C, M ou X), que representa um valor numérico, seguida por um número, que especifica o múltiplo desse valor. Os valores numéricos correspondentes às letras são os seguintes: A =  $10^{-8}$  (Wm<sup>-2</sup>), B =  $10^{-7}$  (Wm<sup>-2</sup>), C =  $10^{-6}$  (Wm<sup>-2</sup>), M =  $10^{-5}$  (Wm<sup>-2</sup>) e X =  $10^{-4}$  (Wm<sup>-2</sup>). Por exemplo,

registrado pelo satélite GOES, com início às 14:58 UT, máximo às 15:25 UT (EGSO – SEC Homepage: [http://sec.ts.astro.it/sec\\_ui.php](http://sec.ts.astro.it/sec_ui.php)).

Este “flare” está associado com a região ativa NOAA AR 9026 (23° N e 15° L). Atividade solar em diferentes comprimentos de onda (de 320 MHz a 15400 MHz) foi relatada por diversos observatórios (de acordo com o SGD), incluindo o Observatório Ondrejov, na República Checa, que registrou emissões até 4,5 GHz.

O coronógrafo LASCO-C2 a bordo do satélite SOHO registrou uma sequência de erupções, incluindo uma CME (Ejeção Coronal de Massa) tipo halo (com primeira detecção às 15:54 UT). Uma explosão tipo IV de longa duração (14:57 - 21:21 UT) foi observada.

A Figura 4.1 mostra o espectro dinâmico da explosão tipo U de 06 de junho de 2000, registrada pelo BSS.

A Figura 4.2 mostra o perfil em raios-X mole do satélite GOES para o dia 06 de junho de 2000, onde é identificado o tempo de ocorrência da explosão tipo U.

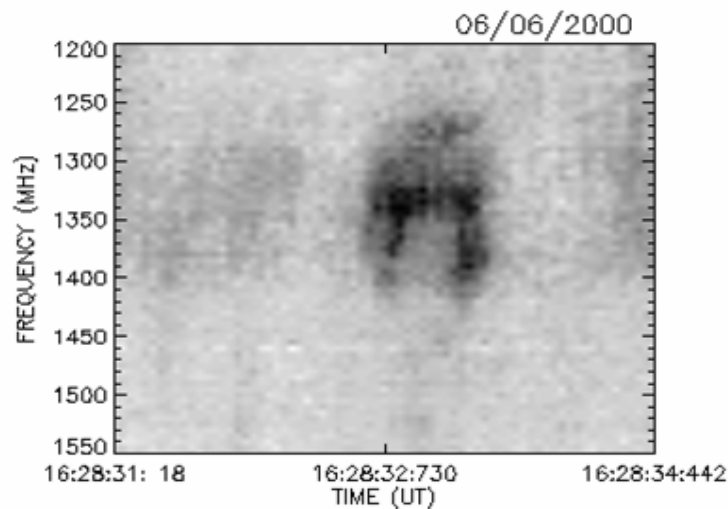


Figura 4.1 – Espectro dinâmico do BSS da explosão tipo U registrada em 06 de junho de 2000.

---

a intensidade de um “flare” classificado como C5.9 é  $5,9 \times 10^{-6} \text{ Wm}^{-2}$  ([http://cse.ssl.berkeley.edu/hessi\\_epo/html/Flares/XrayCandles.html](http://cse.ssl.berkeley.edu/hessi_epo/html/Flares/XrayCandles.html)).

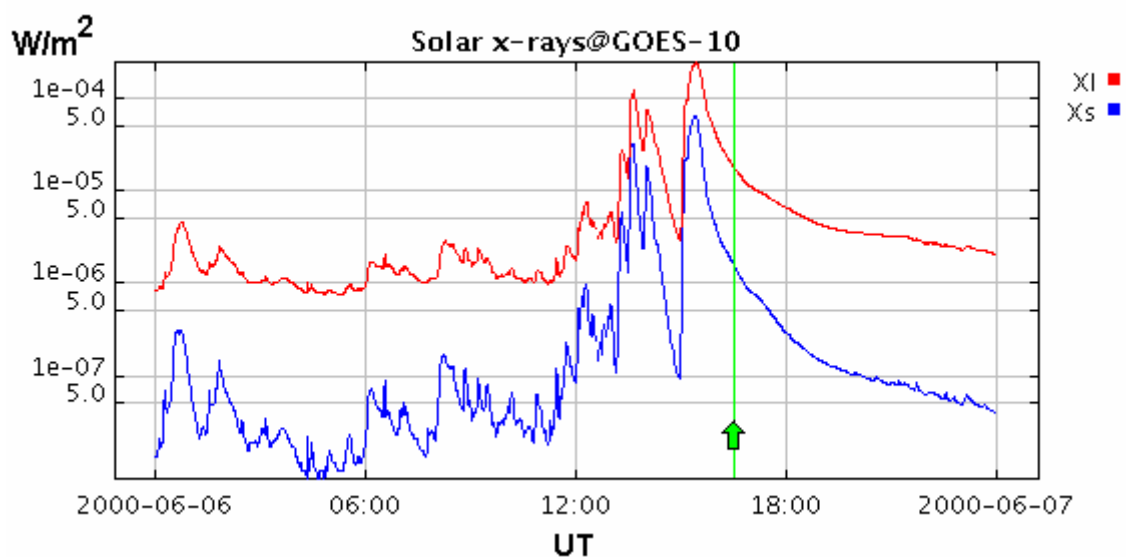


Figura 4.2 - Perfil em raios-X mole do satélite GOES-10, em 06 de junho de 2000. A seta indica o instante aproximado (~16:28 UT) de ocorrência da explosão tipo U, associada à fase de decaimento de um “flare” classificado como X2.3.

Fonte: SPIDR website (<http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr>).

#### 4.2.2 Explosão tipo U de 12 de dezembro de 2000 (Nº2)

Em 12 de dezembro de 2000, o BSS registrou uma estrutura fina de rádio-emissão bastante fraca com morfologia tipo U às 14:43 UT. Outras estruturas finas também foram registradas pelo BSS, no intervalo de tempo de 14:40 às 14:44 UT. Tal atividade está associada a um “flare” solar detectado em raios-X pelo satélite GOES de classe M1.3, cujo início foi às 14:37 UT, o pico às 15:07 UT e o término às 15:23 UT, segundo a homepage do EGSO – SEC ([http://sec.ts.astro.it/sec\\_ui.php](http://sec.ts.astro.it/sec_ui.php)). Este “flare” ocorreu associado à região ativa NOAA AR 9267.

Além disso, foram também registrados eventos na rádio-frequência fixa de 2695 MHz pelas estações “San Vito Solar Observatory” - SVTO e “Sagamore Hill Radio Observatory” - SGMR (SGD, 2001). A Figura 4.3 mostra o espectro dinâmico da explosão tipo U de 12 de dezembro de 2000, registrada pelo BSS. A Figura 4.4 mostra o perfil em raios-X mole do satélite GOES para o dia 12 de dezembro de 2000, onde é identificado o tempo de ocorrência da explosão tipo U.

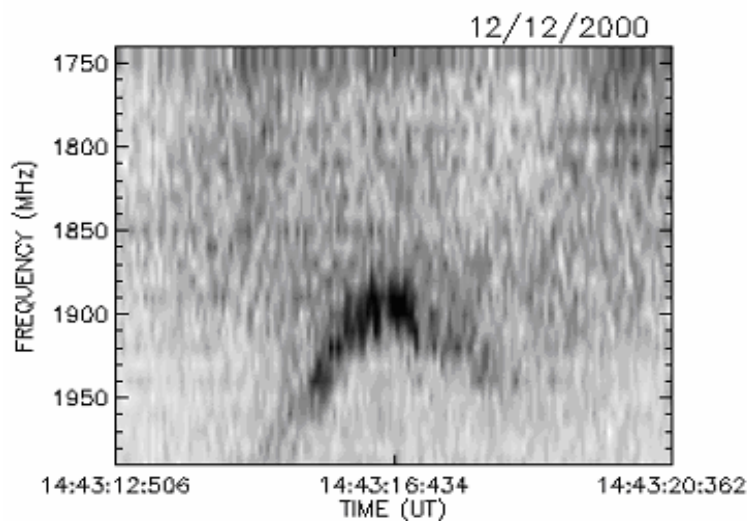


Figura 4.3 - Espectro dinâmico da explosão tipo U registrada pelo BSS em 12 de dezembro de 2000.

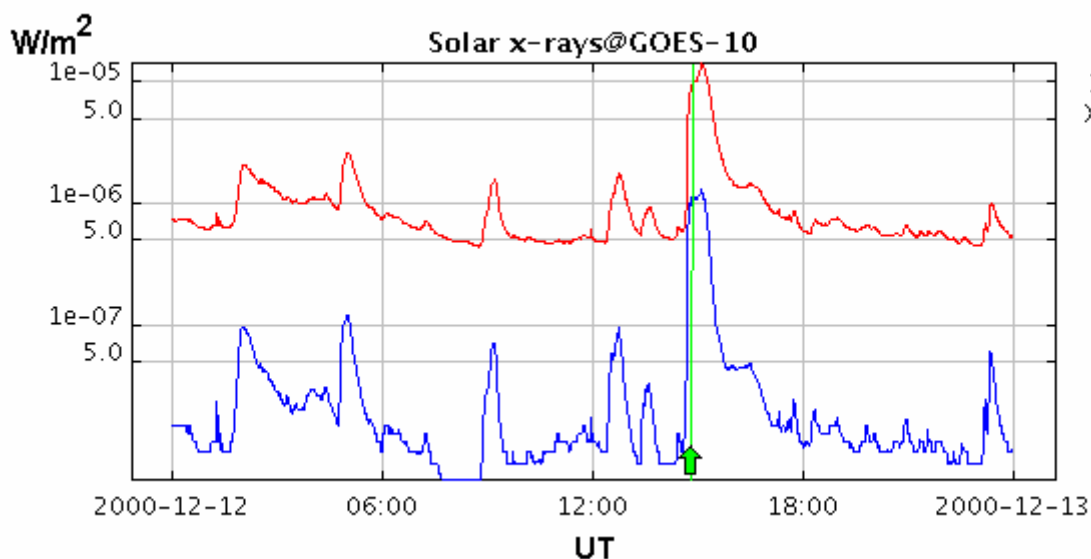


Figura 4.4 - Perfil em raios-X mole do satélite GOES-10, em 12 de dezembro de 2000. A seta indica o instante aproximado (~14:43 UT) de ocorrência da explosão tipo U, associada à fase impulsiva de um “flare” classificado como M1.3.

Fonte: SPIDR Website (<http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr>).

#### 4.2.3 Explosão tipo J de 07 de junho de 2001 (Nº3)

A explosão tipo J registrada pelo BSS em 07 de junho de 2001 (com pico às ~16:11 UT) ocorreu logo após a fase impulsiva de um “flare” solar registrado em raios-X pelo satélite GOES, classificado como C2.5. Os instantes de início, pico e término deste “flare” em raios-X são, respectivamente, 16:04 UT, 16:09 UT e 16:14 UT. Este “flare” está associado com a região ativa NOAA AR 9484.

De acordo com o SGD, associadas a este evento foram registradas emissões rádio espectrais tipo III (intensidade 2) e tipo V (intensidade 2). A Figura 4.5 mostra o espectro dinâmico da explosão tipo J de 07 de junho de 2001. A Figura 4.6 mostra o perfil em raios-X mole do satélite GOES para o dia 07 de junho de 2001, onde é identificado o tempo de ocorrência da explosão tipo J.

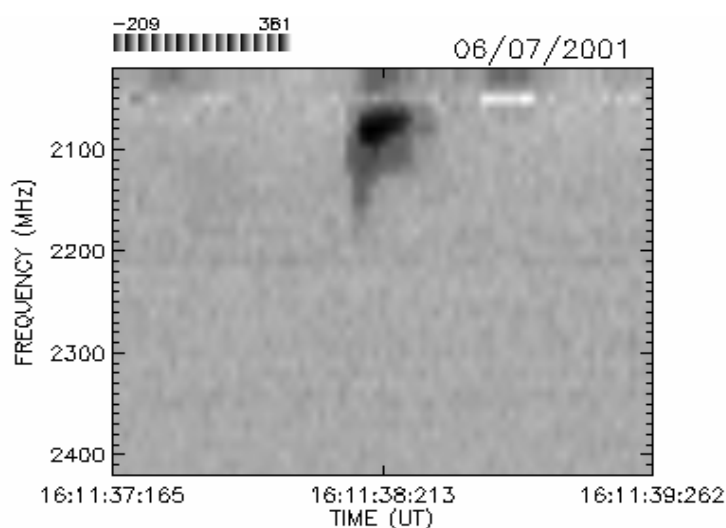


Figura 4.5 - Espectro dinâmico da explosão tipo J registrada pelo BSS em 07 de junho de 2001.

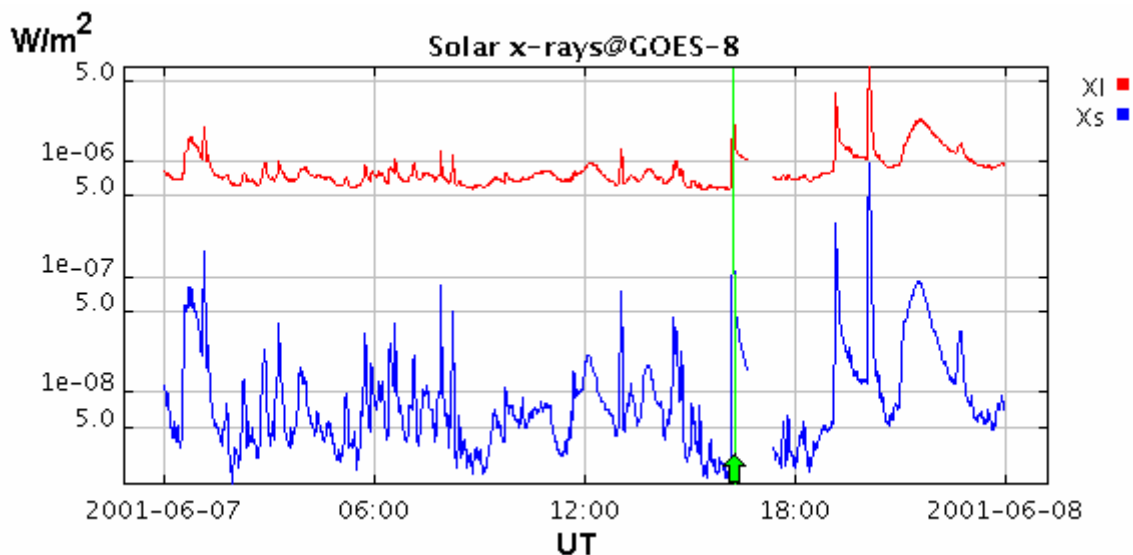


Figura 4.6 - Perfil em raios-X mole do satélite GOES-8, em 07 de junho de 2001. A seta indica o instante aproximado (~16:11 UT) de ocorrência da explosão tipo J, associada à fase impulsiva de um “flare” classificado como C2.5.

Fonte: SPIDR Webpage (<http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr>).

#### 4.2.4 Explosão tipo J de 22 de agosto de 2001 (Nº4)

A estrutura fina tipo J-invertido registrada em rádio frequências decimétricas pelo BSS, entorno de 15:14 UT é umas das estruturas finas que podem estar associada a um “flare” solar

em raios-X, classe C3.7, registrado pelo satélite GOES, com início às 15:02 UT, máximo às 15:06 UT e término às 15:10 UT. Este “flare” está associado à região ativa NOAA AR 9591. A Figura 4.7 mostra o espectro dinâmico da explosão tipo J de 22 de agosto de 2001. A Figura 4.8 mostra o perfil em raios-X mole do satélite GOES para o dia 22 de agosto de 2001, onde é identificado o tempo de ocorrência da explosão tipo J.

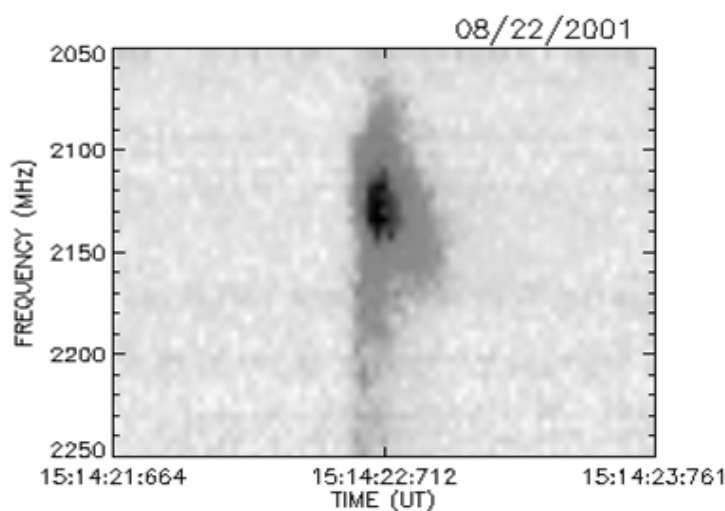


Figura 4.7 - Espectro dinâmico de emissão tipo J registrada em 22 de agosto de 2001.

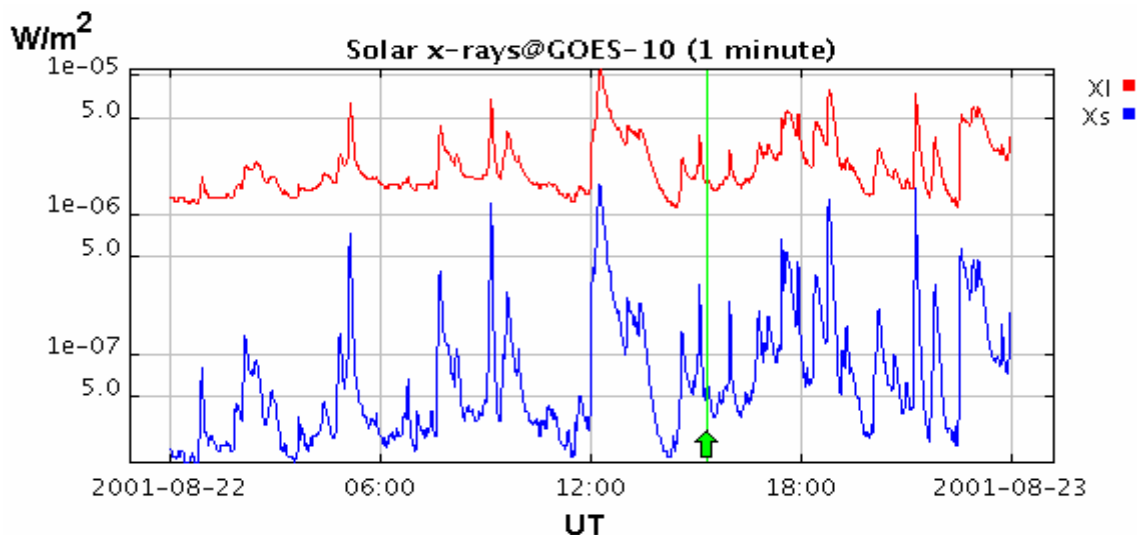


Figura 4.8 - Perfil em raios-X mole do satélite GOES-10, em 22 de agosto de 2001. A seta indica o instante aproximado (~15:14 UT) de ocorrência da explosão tipo J, associada a um “flare” classificado como C3.7.

Fonte: SPIDR website (<http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr>).

#### 4.2.5 Explosão tipo U de 25 de outubro de 2001 (Nº5)

A explosão tipo U registrada pelo BSS em 25 de outubro de 2001, às 15:13 UT, está associada a um “flare” de intensidade X1.3 em raios-X, observado pelo satélite GOES, com

pico às 15:02 UT. Este evento está associado à região ativa NOAA AR 9672. Nesta data, às 15:26 UT, o instrumento LASCO-C2/SOHO detectou a ocorrência de uma CME tipo halo. A Figura 4.9 mostra o espectro dinâmico gerado pelo BSSView da explosão tipo U de 25 de outubro de 2001. A Figura 4.10 mostra o perfil em raios-X mole do satélite GOES para o dia 25 de outubro de 2001, onde é identificado o tempo de ocorrência da explosão tipo U.

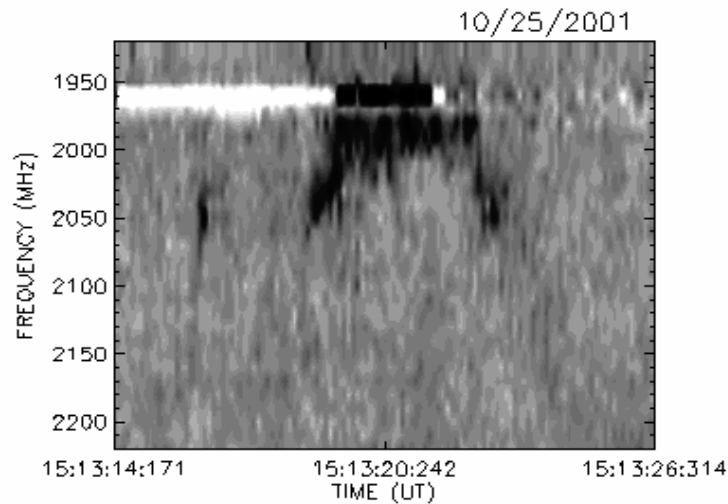


Figura 4.9 - Espectro dinâmico de emissão tipo U registrada em 25 de outubro de 2001. A Faixa clara horizontal representa um sinal de interferência.

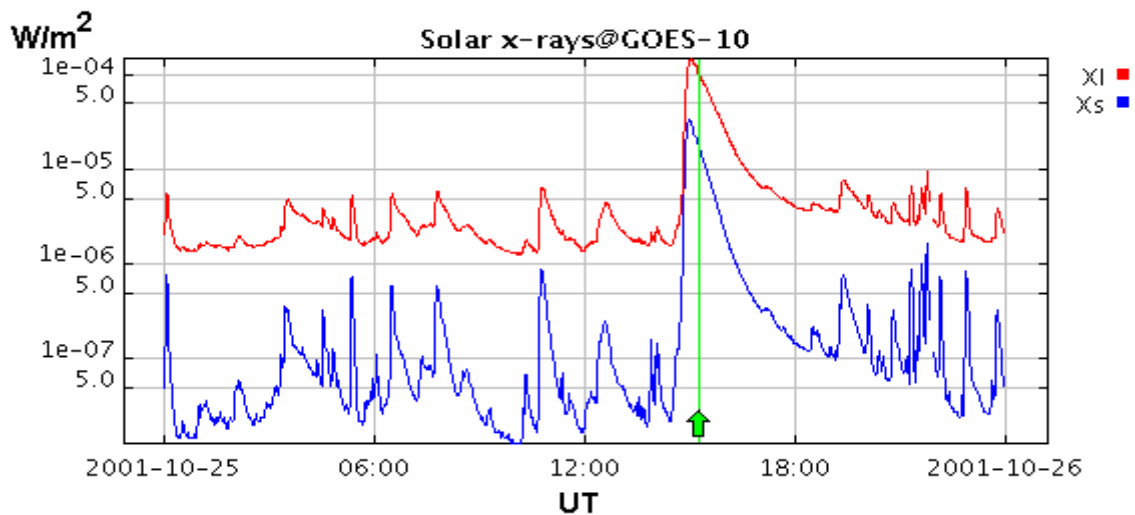


Figura 4.10 - Perfil em raios-X mole do satélite GOES-10, em 25 de outubro de 2001. A seta indica o instante aproximado (~15:13 UT) de ocorrência da explosão tipo U, associada a um “flare” classificado como X1.3.

Fonte: SPIDR website (<http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr>).

A Tabela 4.2 sumariza os “flares” solares observados em raios-X pelo satélite GOES, associados às explosões tipo U e tipo J selecionadas para a análise. Relaciona a atividade



associada em rádio frequências, incluindo também a ocorrência de CMEs e a região ativa associada à ocorrência dos “flares” e sua localização.

Tabela 4.2 – Região ativa e atividade solar associada às explosões tipo U e J selecionadas.

Nº	Raios-X (GOES)		CME Máximo (UT)	Região Ativa		Atividade em rádio		
	Classe	Máximo (UT)		AR NOAA	Posição	Tipo <sup>+</sup>	Frequência (MHz)	Estação*
1	X2.3	15:25	Halo 15:54	9026	23° N	IV	35–85	SVTO
					15° L	IV	30–80	SGMR
						DCIM	400-4000	BLEN
						DCIM	2000-4500	ONDR
2	M1.3	15:07	-	9267	07° N	FIXA	2695	SGMR
					25° L	FIXA	2695	SVTO
3	C2.5	16:09	-	9484	06° S	CONT	25-180	SVTO
					44° O	III	25-142	HOLL
						III	300-600	BLEN
						III	30-70	SGMR
4	C3.7	15:06	-	9591	17° S 77° L	DCIM	800-1283	ONDR
5	X1.3	15:02	Halo 15:26	9672	17° S	DCIM	150-4000	BLEN
					20° O	II	140-1450	BLEN
						IV	40-800	POTS
						II	66-180	SVTO
						II	68-157	HOLL
	IV	51-180	HOLL					

+A nomenclatura para o tipo de atividade segue a convenção adotada no SGD.

\*Sigla dos rádio-observatórios: SVTO (San Vito Solar Observatory, Itália), SGMR (Sagamore Hill Solar Radio Observatory, USA), BLEN (Bleien Observatory, Suíça), ONDR (Observatório Ondrejov, República Checa), POTS (Potsdam, Alemanha) e HOLL (Holloman, USA).

### 4.3 Parâmetros observacionais das explosões solares tipo U e tipo J

Diretamente do espectro dinâmico de cada explosão selecionada foram obtidos os seguintes parâmetros observacionais:

- tempo de início ( $t_i$ );
- tempo de fim ( $t_f$ );
- duração total ( $\Delta t$ );
- intervalo de tempo do ramo ascendente ( $\Delta t_a$ );
- intervalo de tempo do ramo descendente ( $\Delta t_d$ );
- frequência de início ( $f_i$ );
- frequência de fim ( $f_f$ );
- frequência de retorno ( $f_r$ );
- banda total de frequência ( $\Delta f$ );
- banda de frequência do ramo ascendente ( $\Delta f_a$ );
- banda de frequência do ramo descendente ( $\Delta f_d$ ); e
- largura de banda instantânea ( $\Delta f_i$ ).

A Figura 4.11 apresenta um espectro dinâmico esquematizado, no qual são representados os principais parâmetros observados obtidos para cada uma das explosões analisadas.

Para a determinação dos parâmetros observacionais, principalmente as medidas de frequência, foram também utilizados as representações (“plots”) dos perfis temporais (recurso de pseudo 3D do programa BSSView, no qual o perfil temporal de cada canal é deslocado verticalmente), que auxiliam na identificação dos canais de frequência associados aos extremos das emissões. A Figura 4.12 mostra os perfis temporais da emissão tipo J de 07 de junho de 2001.

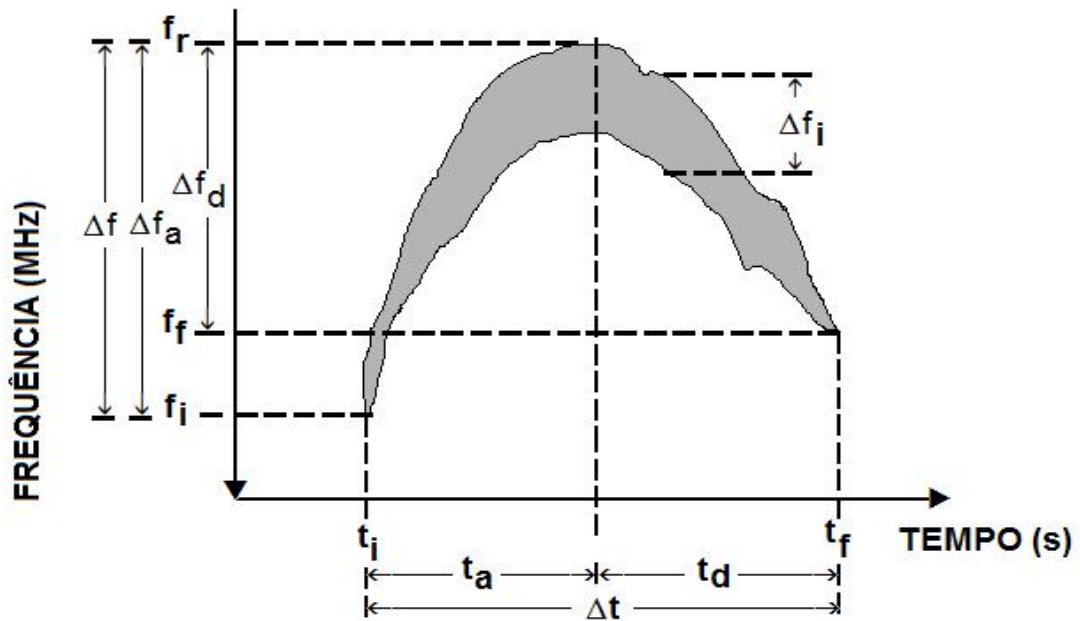


Figura 4.11 – Espectro dinâmico esquematizado de uma explosão tipo U, no qual são ilustrados os seguintes parâmetros observacionais: tempo de início ( $t_i$ ); tempo de fim ( $t_f$ ); duração total ( $\Delta t$ ); intervalo de tempo do ramo ascendente ( $\Delta t_a$ ); intervalo de tempo do ramo descendente ( $\Delta t_d$ ); frequência de início ( $f_i$ ); frequência de fim ( $f_f$ ); frequência de retorno ( $f_r$ ); banda total de frequência ( $\Delta f$ ); banda de frequência do ramo ascendente ( $\Delta f_a$ ); banda de frequência do ramo descendente ( $\Delta f_d$ ) e largura de banda instantânea ( $\Delta f_i$ ).

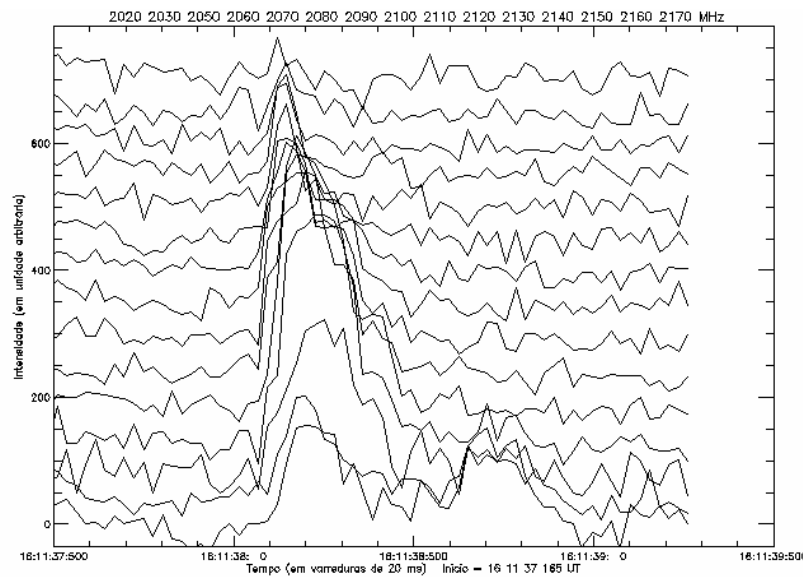


Figura 4.12 – Perfis temporais (pseudo 3D) da explosão tipo J registrada pelo BSS em 07 de junho de 2001.

Cabe ressaltar ainda que, como as determinações são feitas a partir dos registros em canal de frequência e varredura, o erro de cada medida foi tomado como sendo a metade do intervalo de frequência entre dois canais sucessivos, para a medida de frequência e a metade do

intervalo entre duas varreduras sucessivas, para as medidas de tempo. Assim, os erros associados à determinação das frequências e tempos dependem, respectivamente, das resoluções espectral e temporal das observações.

A Tabela 4.3 apresenta as resoluções temporal e espectral dos dados das observações com o BSS, relativos às datas das estruturas finas tipo U e tipo J selecionadas para a análise.

Tabela 4.3 – Resoluções temporal e espectral dos dados das explosões selecionadas.

Nº	Data	Resolução temporal (ms)	Resolução espectral (MHz)
1	06/06/2000	50	5
2	12/12/2000	50	10
3	07/06/2001	20	10
4	22/08/2001	20	5
5	25/10/2001	100	10

A duração total ( $\Delta t$ ) para uma explosão foi determinada diretamente da diferença entre os tempos de fim ( $t_f$ ) e de início ( $t_i$ ) medidos, isto é,  $\Delta t = t_f - t_i$ . Analogamente, a banda total de frequência ( $\Delta f$ ) foi determinada como sendo o maior intervalo de frequência entre a frequência extrema (inicial ou final) e a frequência de retorno ( $f_r$ ), ou seja,  $\Delta f = f_i - f_r$ , no caso de  $f_i > f_r$ , e  $\Delta f = f_f - f_r$ , no caso de  $f_i < f_r$ .

A Tabela 4.4 apresenta um resumo dos parâmetros observados para as 5 explosões tipo U e tipo J selecionadas para a análise.

Cabe mencionar que para a explosão tipo U observada em 25 de outubro de 2001 (explosão Nº5), o espectro dinâmico apresentou um intenso sinal de rádio interferência entorno de 1960-1950 MHz. Isto dificultou a medida da frequência de retorno para esta emissão.

Tabela 4.4 – Parâmetros observados das explosões tipo U e tipo J selecionadas.

Nº	Frequência de início (MHz)	Frequência de fim (MHz)	Frequência de retorno (MHz)	Banda total de frequência (MHz)	Duração total (ms)
1	1420 ± 3	1255 ± 3	1338 ± 3	165 ± 3	650 ± 25
2	1970 ± 5	1870 ± 5	1920 ± 5	100 ± 5	3400 ± 25
3	2170 ± 5	2050 ± 5	2110 ± 5	120 ± 5	510 ± 10
4	2050 ± 3	2246 ± 3	2148 ± 3	196 ± 3	550 ± 10
5	2060 ± 5	2040 ± 5	1940 ± 5	120 ± 5	4400 ± 50

† Foi adotado como erro de leitura dos parâmetros observados em frequência e tempo a metade da resolução associada à medida.

#### 4.4 Análise dos dados das explosões tipo U e tipo J

A partir dos parâmetros observados medidos do espectro dinâmico, para cada explosão selecionada, foram estimados os principais parâmetros da emissão e da fonte emissora, como a densidade eletrônica na fonte, as taxas de deriva em frequência dos ramos ascendente e descendente da emissão, a velocidade do feixe de elétrons, a temperatura da região e o limite inferior para a intensidade do campo magnético na fonte. Inicialmente, foram determinadas as taxas de deriva em frequência dos ramos ascendente e descendente das emissões tipo U. Foi também estimada a densidade de fluxo da rádio-emissão. A metodologia para determinação destes parâmetros é descrita nas subseções a seguir.

##### 4.4.1 Taxa de deriva em frequência

Conforme mencionado anteriormente, por razões históricas, os espectros dinâmicos das emissões rádio solares são apresentados com o eixo em frequência (eixo vertical) invertido, ou seja, os valores de frequência crescem para baixo (e decrescem para cima). Desta forma será adotada a seguinte convenção para o sinal da taxa de deriva em frequência ( $df/dt$ ):

-  $df/dt > 0$  (taxa de deriva positiva) para emissões “normais”, que apresentam emissão de alta para baixa frequência (deslocamento para a coroa); e

-  $df/dt < 0$  (taxa de deriva negativa ou “reverse slope” - RS) para emissões “inversas”, que apresentam emissão de baixa para alta frequência (deslocamento para a fotosfera).

Para as emissões tipo U, que apresentam os ramos ascendente e descendente, a determinação das taxas de deriva em frequência de cada um dos ramos foi obtida a partir de um ajuste linear entre os picos de emissão identificados nos extremos de cada ramo. Portanto, considerando a frequência e o tempo de início e a frequência de retorno e o respectivo instante foi determinada a taxa de deriva para o ramo ascendente e, da mesma forma, considerando a frequência de retorno e a frequência e o tempo de fim foi determinada a taxa de deriva para o ramo descendente. A Figura 4.13 ilustra estes parâmetros utilizados na determinação das taxas de deriva em frequência.

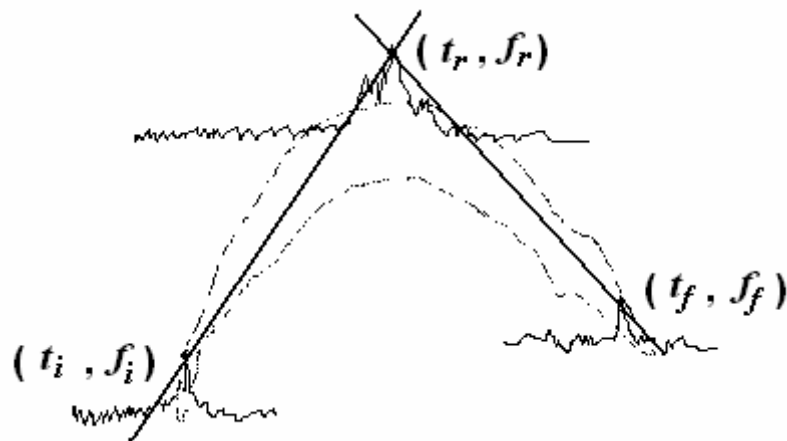


Figura 4.4 – Representação esquemática sem escala do espectro dinâmico de uma explosão tipo U (silhueta tracejada), ao qual são sobrepostos os perfis temporais associados aos extremos da emissão e identificadas as frequências de início ( $f_i$ ), de retorno ( $f_r$ ) e de fim ( $f_f$ ) e os respectivos instantes de tempo, de início ( $t_i$ ), de retorno ( $t_r$ ) e de fim ( $t_f$ ).

A taxa de deriva em frequência ( $df/dt$ ) também pode ser expressa em função dos seguintes fatores: escala de altura de densidade eletrônica ( $H$ ) (seção 4.4.6), frequência ( $f$ ) de observação da emissão, velocidade do feixe de elétrons ( $v_b$ ) (seção 4.4.5), ângulo  $\theta$  da localização da região ativa em relação ao centro do disco solar, pela equação (WANG et al., 2001a)

$$df/dt = -0,5 H^1 f v_b \cos\theta \quad , \quad (1)$$

#### 4.4.2 Densidade de fluxo (intensidade da rádio-emissão)

Os dados de rádio emissões solares são registrados pelo BSS em unidades arbitrárias de intensidade. O BSS não possui um procedimento de calibração absoluta dos dados em unidades de fluxo solar, por exemplo. A estimativa da intensidade (densidade de fluxo) de uma dada emissão detectada é indireta, feita por meio de uma calibração.

O procedimento de calibração em intensidade (descrito no Apêndice A) é baseado na comparação entre o nível de intensidade do pico da emissão com o nível do sol calmo (“background”) e um nível padrão gerado instrumentalmente. A calibração deste nível é feita pela interpolação de intensidade de fluxo em outras frequências, fornecida por diferentes observatórios e obtidas pela Internet, por exemplo, do site do “Solar Geophysical Data” (SGD).

Numa dada frequência  $f$ , a densidade de fluxo do solar calmo (“background”),  $S_o$ , foi obtida pelo método de calibração proposto por Guidice e Castelli (1971) através da expressão:

$$S_o(f) = \left[ \frac{S(f_a)}{S(f_b)} \right]^{\Phi(f)} \times S(f_a) , \quad (2)$$

em que,

$$\Phi(f) = \frac{\log(f / f_a)}{\log(f_a / f_b)} , \quad (3)$$

sendo a frequência  $f$ , situada entre as frequências  $f_a$  e  $f_b$ , cujas densidades de fluxo são  $S(f_a)$  e  $S(f_b)$ , respectivamente.

No procedimento de calibração, foi identificada a frequência do canal, cuja intensidade da emissão foi máxima. Considerando a banda de frequência das explosões analisadas, foram utilizadas para a interpolação as frequências 1415 MHz ( $f_a$ ) e 2695 MHz ( $f_b$ ) para 4 explosões. Para a explosão de 06 de junho de 2000, foram utilizadas as frequências 610 MHz ( $f_a$ ) e 1415 MHz ( $f_b$ ). A densidade de fluxo para essas frequências é fornecida pelo SGMR. A Tabela 4.5 apresenta os valores de intensidade de fluxo para estas as frequências, medidos para as datas das explosões analisadas.

Pelas equações (2) e (3), a intensidade de fluxo do nível do “background” (em unidades de fluxo solar) para cada uma das explosões selecionadas pode ser estimada. A partir deste valor de “background”, um valor limite inferior para a intensidade do pico de cada uma das explosões analisadas foi obtido.

Tabela 4.5 – Valores de intensidade de fluxo do sol calmo ( $S(f)$ ) em diferentes frequências nas dadas das explosões tipo U e J analisadas.

Data	$S(610)$ (s.f.u.)	$S(1451)$ (s.f.u.)	$S(2695)$ (s.f.u.)
06/06/2000	76	139	-
12/12/2000	-	115	126
07/06/2001	-	127	149
22/08/2001	-	107	156
25/10/2001	-	161	228

Fonte: SGD (<http://sgd.ngdc.noaa.gov/sgd/jsp/solarindex.jsp>).

#### 4.4.3 Densidade eletrônica

No mecanismo de emissão de plasma, a frequência da rádio-emissão detectada pode ser considerada como a frequência de plasma ( $f_p$ ) do ambiente solar, que por sua vez, está relacionada com a densidade eletrônica ( $N_e$ ) da atmosfera solar pela equação (MCLEAN, 1985, p.93):

$$f_p = s 8,98 \times 10^{-3} \sqrt{N_e} \text{ (MHz)}, \quad (4)$$

onde  $s$  é o parâmetro harmônico (sendo  $s = 1$  ou  $s = 2$ , respectivamente para emissão no estado fundamental ou no segundo harmônico, respectivamente).

Considerando que uma explosão tipo U é gerada pelo mecanismo de emissão de plasma, a frequência de rádio-emissão observada será a própria frequência de plasma. De tal forma que a densidade eletrônica pode ser determinada. Para o cálculo da densidade eletrônica foi considerada a frequência média da banda total de frequência da rádio-emissão, entre as



frequências extremas da banda, obtida pela expressão  $f_p = (f_i + f_r) / 2$  e a emissão no segundo harmônico, ou seja, considerando  $s = 2$ .

#### 4.4.4 Tempo de vida dos feixes de elétrons

Na região da atmosfera solar associada às emissões de plasma na faixa decimétrica, os feixes de elétrons acelerados durante o “flare” se propagam através de um meio relativamente denso, podendo ser rapidamente termalizados por colisões coulombianas. O tempo de colisão ( $t_D$ ), dado em segundos, pode ser obtido por (BOYD ; SANDERSON, 1969):

$$t_D = 3,1 \times 10^{-20} v_b^3 N_e^{-1} \quad , \quad (5)$$

sendo  $N_e$  a densidade eletrônica e  $v_b$  é a velocidade do feixe de elétrons. Desta forma, considerando o tempo de colisão como sendo o tempo de duração total da emissão, pode-se obter a mínima velocidade de propagação do feixe de elétrons.

#### 4.4.5 Velocidade do feixe de elétrons

Conforme mencionado na seção anterior, a velocidade do feixe de elétrons foi determinada pela Equação (5), considerando o tempo de colisão como sendo o tempo de vida da emissão, ou seja, a duração total, durante a qual a emissão é detectada antes que o feixe seja termalizado.

Alternativamente, o valor da velocidade do feixe ( $v_b$ ) pode ser estimado usando a equação (6) (BENZ;BERNOLD; DENNIS, 1983) dada a seguir, de forma a se verificar a consistência com o valor estimado a partir da Equação (5),

$$\frac{T}{10^6 K} = 1,08 \frac{v_b}{c/3} \frac{f}{df/dt} \frac{1}{\cos\theta} \quad , \quad (6)$$

em que  $c$  representa a velocidade da luz,  $f$  é a frequência de observação,  $df/dt$  é a taxa de deriva em frequência e  $\theta$  é o ângulo que depende da posição da região ativa no disco solar. O

valor do ângulo  $\theta$  pode ser obtido a partir das coordenadas da região ativa fornecidos na Tabela 4.2.

#### 4.4.6 Escala de altura de densidade eletrônica

A escala de altura de densidade ( $H$ ) para o plasma da atmosfera solar considerado em equilíbrio térmico é dada por (ASCHWANDEN et al. 1992)

$$H(T) = \frac{(1 + \alpha) k_b T}{\delta m_p g} = 92000 \left( \frac{T}{2 \times 10^6 K} \right) \text{ km}, \quad (7)$$

em que  $\alpha = 1,22$  é a razão entre o número de elétrons e de prótons,  $\delta = 1,44$  é o peso molecular médio,  $k_b$  é a constante de Boltzmann,  $m_p$  é a massa do próton e  $g$  é a aceleração da gravidade local. Desta forma, a partir do valor da temperatura local é possível estimar a escala de altura de densidade.

Por outro lado, uma vez conhecida a velocidade do feixe ( $v_b$ ), a taxa de deriva em frequência ( $df/dt$ ) e o ângulo  $\theta$  da posição da região ativa no disco solar, a partir da Equação (1), a escala de altura de densidade eletrônica será dada pela seguinte expressão

$$H = -0,5 (df/dt)^{-1} f v_b \cos \theta \quad . \quad (8)$$

#### 4.4.7 Temperatura da região

Uma relação entre temperatura ( $T$ ), pressão ( $p$ ) e tamanho ( $L$ ) do da estrutura magnética em forma de arco é dada por (ROSNER, TUCKER ; VAIANA, 1978):

$$T = 1,4 \times 10^3 (p L)^{1/3} \quad . \quad (9)$$

Da lei dos gases perfeitos tem-se que  $p = N_e k_b T$ , sendo  $k_b$  a constante de Boltzmann. Tal relação também é aplicável no caso do plasma da atmosfera. Então, a temperatura será dada por:

$$T = 6,2 \times 10^{-4} (N_e L)^{1/2} \quad (10)$$

Uma aproximação para o tamanho do arco pode ser obtida baseado na cinemática, considerando o comprimento como o produto da velocidade do feixe de elétrons pelo tempo de duração da rádio-emissão, ou seja,

$$L \approx t_D v_b. \quad (11)$$

#### 4.4.8 Intensidade do Campo Magnético

O parâmetro  $\beta$ , que expressa a razão entre a pressão térmica e a pressão magnética é dada por:

$$\beta = 3,47 \times 10^{-15} (N_e T B^{-2}) \quad (12)$$

sendo  $B$  a intensidade do campos magnético, dado em Gauss. A condição para o plasma estar magneticamente confinado, como ocorre nos arcos magnéticos (“loops”) presentes na atmosfera solar, é que  $\beta < 1$  (a pressão magnética domina a pressão do gás). Considerando esta dependência, e os valores de densidade eletrônica e de temperatura estimados anteriormente, pode-se obter um limite inferior para a intensidade do campo magnético ( $B_{min}$ ).

Nas seções subsequentes, foi apresentada uma metodologia utilizada no presente trabalho para a análise das emissões tipo U observadas, baseada em trabalhos publicados anteriormente (vide por exemplo, ASCHWANDEN et al., 1992; YAO et al., 1997a; WANG et al., 2001a; NING et al., 2003). Desta forma, a partir das características observadas no espectro dinâmico foi possível determinar os principais parâmetros da fonte. Os valores calculados de taxas de deriva em frequência, densidade de fluxo, velocidade do feixe emissor, temperatura da região emissora e intensidade do campo magnético, para as cinco estruturas finas analisadas, são apresentados e discutidos no Capítulo 5.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Aplicando a metodologia descrita nas subseções anteriores, cada uma das 5 explosões selecionadas foi analisada e os parâmetros determinados. A seguir, os valores calculados são apresentados e discutidos. Os resultados são comparados com os poucos trabalhos anteriormente publicados sobre a análise de explosões tipo U e suas variantes.

### 5.1 Densidade de fluxo

A densidade de fluxo de “background” para a frequência de maior intensidade de cada explosão foi obtida pela interpolação descrita na seção 4.4.2. A partir da intensidade de “background” foi estimado o limite inferior para a intensidade do pico da explosão. Os valores obtidos são apresentados na Tabela 5.1.

Conforme observado nos espectros dinâmicos das explosões analisadas, para as quais, em todos os casos, foi executada a rotina do programa BSSView para subtração do ruído de fundo, as emissões detectadas são relativamente fracas. Com exceção da explosão identificada como N°3, as demais a apresentaram intensidade inferior a 1 dB acima do nível do fundo no espectro dinâmico, quando comparado com as escalas de calibração (ver Apêndice A). Os valores da densidade de fluxo estimada estão entre cerca de 20 s.f.u. e 80 s.f.u., como mostra a Tabela 5.1.

Tabela 4.2 – Frequência relativa ao canal de emissão máxima e valores de intensidade de fluxo de “background” e do pico da emissão das explosões analisadas.

Data	Frequência (máx. emissão) (MHz)	Intensidade de fluxo de “background” (s.f.u.)	Intensidade de fluxo do pico (s.f.u.)
06/06/2000	1335	133,3	< 20
12/12/2000	1890	120,9	< 30
07/06/2001	2070	135,6	< 80
22/08/2001	2130	122,8	< 40
25/10/2001	1990	189,7	< 25

Cabe ressaltar que, conforme apresentado na Tabela 5.1, o fluxo do “background” associado à explosão solar de 25 de outubro de 2001, está cerca de 50% mais alto que a média obtida para as outras 4 explosões analisadas.

Resultados obtidos anteriormente sobre a observação e a análise de explosões tipo U na faixa decimétrica, apontam que tais emissões apresentam densidades de fluxo variando entre apenas algumas unidades de fluxo solar até dezenas de unidades de fluxo solar, semelhantes às estimadas no presente trabalho.

As três explosões tipo U decimétricas observadas na banda de (1,1 - 1,7) GHz e com frequência de retorno em torno de 1,3 GHz, analisadas por Aschwanden et al. (1992), apresentaram densidade entre 2 e 6 s.f.u.. Uma explosão tipo U observada pelo Observatório Ondrejov na banda de frequência de 1,0 a 2,8 GHz, analisada por Yao et al. (1997a; 1997b), apresentou densidade de fluxo entre 100 a 150 s.f.u.. Para as duas explosões tipo U observadas entre 2,6 e 3,8 GHz, analisadas por Wang et al. (2001a), a densidade de fluxo total foi de 200 s.f.u. e 140 s.f.u..

## **5.2 Taxa de deriva em frequência dos ramos ascendente e descendente**

Conforme discutido anteriormente, os espectros dinâmicos das explosões tipo U e J revelam a variação da frequência das emissões com o tempo. Seguindo a metodologia apresentada no Capítulo 4, e as considerações discutidas anteriormente sobre a dependência da frequência com a densidade eletrônica e com a altura na atmosfera solar, quando assumido o mecanismo de emissão de plasma, foram obtidas as taxas de deriva em frequência dos ramos ascendente e descendente de cada uma das explosões analisadas e também as velocidades dos feixes de elétrons emissores.

A Tabela 5.2 apresenta os valores para as taxas de deriva em frequência dos ramos ascendente e descendente determinadas.

Exceto para a explosões de 06 de junho de 2000, cujo valor de taxa de deriva em frequência para o ramo descendente é superior a  $10^3$  MHz/s, os demais valores obtidos, da ordem de dezenas de MHz/s, são cerca de 1 a 1,5 ordens de grandeza inferiores aos valores típicos para as emissões tipo III e suas variantes nesta faixa de frequência. Wang et al. (2001a) obtiveram para duas explosões tipo U, taxas de deriva em frequência de 1730 MHz/s e 3000 MHz/s, para

o ramo ascendente e 2010 MHz/s e 1700 MHz/s para o ramo descendente. Valores ainda superiores, de 4500 MHz/s e 3600 MHz/s foram obtidos por Ning et al. (2003), respectivamente, para os ramos ascendente e descendente de uma explosão classificada como tipo N parcial (tipo N com ausência do ramo inicial, o que resulta numa explosão tipo U-like) observada em 6 GHz. Yao et al. (1997a; 1997b) obtiveram taxa de deriva em frequência para os ramos ascendente e descendente de 1250 MHz/s e 2250 MHz/s, respectivamente.

Tabela 4.3 – Taxa de deriva em frequência dos ramos ascendente e descendente das explosões analisadas.

Data	Taxa de deriva em frequência (MHz/s)	
	Ramo ascendente	Ramo descendente
06/06/2000	275	1160
12/12/2000	49	74
07/06/2001	61	83
22/08/2001	-	-
25/10/2001	47	60

Tais discrepâncias podem ser resultado da adoção de um ajuste linear simplificado para a variação da frequência em função do tempo nos espectros dinâmicos. Além disso, não foram considerados na determinação das taxas de deriva efeitos de projeção, sendo os arcos hipoteticamente considerados perpendiculares ao disco solar.

### 5.3 Velocidade do feixe de elétrons

Conforme discutido anteriormente, as explosões tipo U, como variante das explosões tipo III são geradas pela emissão de plasma associada à interação dos feixes de elétrons acelerados durante os “flares” e se deslocando no plasma da atmosfera solar. Desta forma, a velocidade de deslocamento do feixe associado a cada emissão foi calculada a partir da Equação (5).

Os cálculos foram realizados considerando tanto uma emissão no fundamental, quanto no segundo harmônico. No entanto, os valores de velocidade obtidos para emissão no fundamental estavam muito acima dos valores esperado para a faixa de frequências

decimétricas ( $\sim 0,3$  c). Portanto, foi assumida emissão no segundo harmônico, pois os valores obtidos para a velocidade do feixe, entre aproximadamente 0,16 e 0,50 c, (os valores individuais para cada explosão são mostrados na Tabela 5.3) são consistentes com as várias determinações anteriores para emissões tipo III na faixa de ondas decimétricas (FERNANDES, 1992; SAWANT et al., 1994; ISLIKER; BENZ, 1994; ASCHWANDEN et al., 1995; FERNANDES; SAWANT, 1996; MELÉNDEZ MORENO, 1997; MELÉNDEZ MORENO et al., 1999; MÉSZÁROSOVÁ et al., 2008) e suas variantes, como as emissões tipo U.

Aschwanden et al. (1992) e Yao et al. (1997a; 1997b), a partir da análise de emissões tipo U decimétricas, respectivamente nas faixas de frequência de (1,1 - 1,7) GHz e (1,0 - 2,8) GHz obtiveram velocidades da ordem de (0,26 – 0,38) c e (0,14 – 0,21) c, respectivamente. Ning et al. (2003) estimaram a velocidade do feixe emissor para a explosão tipo N parcial em 0,33 c. Portanto, os valores obtidos no presente trabalho são compatíveis com os valores publicados na literatura.

#### 5.4 Temperatura do arco

O cálculo da temperatura da região emissora pela Equação (10) apresenta uma dependência com a densidade eletrônica e com a dimensão do arco da estrutura magnética.

A partir de observações com o VLA para os arcos associados à região emissora de explosões tipo U, Aschwanden et al. (1992), obtiveram uma medida precisa da dimensão da estrutura magnética, considerada semicircular com um raio de curvatura de  $r_o = 1,1 \times 10^{10}$  cm. A extensão do arco, definida como o comprimento da estrutura semicircular, é dada por  $L = (\pi/2) r_o$ , que equivale a um valor da ordem de  $1,7 \times 10^{10}$  cm. A partir deste valor, na Equação (5), aqueles autores obtiveram uma temperatura da ordem de  $10^6$  K, relativamente elevada para a região da atmosfera solar associada as emissões na faixa de frequências decimétricas.

Inicialmente, a temperatura da região associada às 5 explosões tipo U e J analisadas neste trabalho foi estimada assumindo o mesmo valor para o raio de curvatura apresentado por Aschwanden et al. (1992). Porém os valores de temperatura se mostraram mais elevados, da ordem de  $10^7$  K.

Por esta razão, para as explosões tipo U e tipo J analisadas, a determinação do comprimento do arco foi baseada apenas em considerações cinemáticas (a partir da velocidade do feixe e da duração total da emissão). Os valores para o comprimento do arco então obtidos foram da ordem de  $3 \times 10^9$  cm. Tais valores são cerca de uma ordem de grandeza menor que os obtidos por Aschwanden et al. (1992) ( $1,7 \times 10^{10}$  cm) a partir das observações com o VLA. Tal discrepância, pode estar associada á própria metodologia de determinação adotada neste trabalho, que não leva em conta efeitos de projeção ou inclinação do arco magnético em relação à linha de visada.

Com os comprimentos do arco estimados, os valores de temperatura obtidos foram da ordem de  $(2,6 \times 10^6 - 1,5 \times 10^7)$  K, conforme apresentados na Tabela 5.3. Apenas dois valores obtidos, da ordem de  $10^7$  K, são superiores ao esperado para a região da atmosfera solar associada com a emissão na faixa de ondas decimétricas. No entanto, temperaturas de  $1 - 3 \times 10^7$  K foram obtidas a partir de observações em raios-X do “Hard X-ray Imager Spectrometer” (HXIS) a bordo do satélite “Solar Maximum Mission” (SMM) (RUST, SIMNETT; SMITH, 1985).

Segundo Aschwanden (2004, p. 28), a temperatura característica na coroa solar pode variar de região para região, dependendo da presença de estruturas: as regiões abertas, como os buracos coronais, apresentam menores temperaturas ( $T < 1$  MK); regiões fechadas, como as presentes no sol clamo, têm temperaturas intermediárias ( $T \approx 1 - 2$  MK); e as regiões ativas, como associadas aos arcos magnéticos, apresentam temperaturas mais elevadas ( $T \approx 2 - 6$  MK). As regiões abertas são mais frias, pois os processos de transporte do plasma quente são mais eficientes, enquanto que nas regiões fechadas o plasma aquecido é aprisionada e a energia não pode fluir livremente. Além disso, nas regiões ativas estão presentes fluxos magnéticos emergentes, conversão de energia magnética para o plasma, e outros processos que contribuem para o aumento da temperatura nessas regiões de campo magnético complexo.

Portando, considerando o plasma confinado no topo do arco magnético, tais valores estão de acordo com o esperado para satisfazer as escalas de altura de densidade. Outro argumento favorável à presença de altas temperaturas no topo do arco, apontado por Aschwanden et al. (1992), são as observações de linhas de cálcio, indicando temperaturas da ordem de  $8 \times 10^6$  K durante a fase pré-flare.



Os valores obtidos também concordam com as determinações da temperatura da região emissora baseadas em análise de explosões tipo U realizadas anteriormente, apontando que a temperatura no topo do arco magnético é de  $(2 - 8) \times 10^6$  K. (ASCHWANDEN et al., 1992; YAO et al., 1997a; 1997b; WANG et al., 2001a). Além disso, Fontenla et al. (1991), concluíram que componentes de diferentes temperaturas (entre  $10^4$  e  $10^7$  K), coexistem num mesmo arco ativo, uma vez que podem ter sido injetados em tubos de fluxo magnéticos pré-existentes com menor densidade.

### **5.5 Intensidade do campo magnético**

Considerando o confinamento do plasma coronal na estrutura magnética foi obtido um valor para o limite inferior do campo magnético na fonte, utilizando os valores de densidade eletrônica (para emissão no segundo harmônico) e da temperatura também calculados anteriormente. Os valores para a intensidade de campo determinados estão aproximadamente no intervalo de 10 - 20 G. Estes valores obtidos estão de acordo com determinações realizadas anteriormente e presentes na literatura.

Yao et al. (1997b), também considerando emissão no segundo harmônico, obtiveram um limite inferior de 9,2 G para o campo magnético no topo do arco. Aschwanden et al. (1992) e Wang et al. (2001a) obtiveram que a intensidade do campo magnético deve ser superior a 13 G e 21 G.

### **5.6 Resumo dos resultados**

Os valores para a densidade eletrônica, considerando emissão no segundo harmônico, para a velocidade do feixe de elétrons, o comprimento do arco magnético, a temperatura na região do cume do arco magnético e para o limite inferior para a intensidade do campo magnético para que haja confinamento do plasma, determinados a partir da análise dos dados de cada uma das explosões tipo U e tipo J são sumarizados na Tabela 5.3.

A Tabela 5.4 apresenta um resumo da comparação dos valores dos parâmetros determinados neste trabalho com valores obtidos por outros autores publicados anteriormente na literatura.

Tabela 4.4 - Resultados da análise das explosões tipo U e tipo J.

Nº	Densidade Eletrônica ( $\text{cm}^{-3}$ )	Velocidade do feixe de elétrons (km/s)	Comprimento do arco (cm)	Temperatura da região (K)	Campo magnético (G)
1	$5,53 \times 10^9$	$4,71 \times 10^4$ (0,16 c)	$3,1 \times 10^9$	$2,6 \times 10^6$	> 11
2	$1,14 \times 10^{10}$	$1,04 \times 10^5$ (0,34 c)	$3,5 \times 10^{10}$	$1,2 \times 10^7$	> 18
3	$1,37 \times 10^{10}$	$5,86 \times 10^4$ (0,19 c)	$3,0 \times 10^9$	$4,0 \times 10^6$	> 7
4	$1,42 \times 10^{10}$	$6,10 \times 10^4$ (0,20 c)	$3,4 \times 10^9$	$4,3 \times 10^6$	> 22
5	$1,23 \times 10^{10}$	$1,16 \times 10^5$ (0,53 c)	$5,1 \times 10^{10}$	$1,5 \times 10^7$	> 20

Tabela 4.5 – Comparação dos resultados obtidos no presente trabalho, da análise das explosões tipo U e tipo J, para a densidade de fluxo ( $S$ ), a velocidade do feixe de elétrons ( $v_b$ ), a temperatura do cume da região emissora ( $T$ ) e o limite inferior para a intensidade do campo magnético ( $B_{min}$ ), com resultados de trabalhos publicados na literatura.

$f$ GHz	$S$ (s.f.u.)	$v_b$ (c)	$T$ ( $\times 10^6$ K)	$B$ (G)	Referência
1,4-2,2	20-80	0,16-0,53	2,6-15,5	7-22	Este trabalho Dutra e Fernandes (2010)
1,1-1,7	2-6	0,26-0,38	8,0	13	Aschwanden et al. (1992)
1,0-2,8	100-150	0,14-0,21	6,3	9,2	Yao et al. (1997a, b)
2,6-3,8	140-200	-	2,0	21	Wang et al. (2001)
5,2-6,2	-	0,33	10,0	130	Ning et al. (2003)

## 6 CONCLUSÃO, COMENTÁRIOS FINAIS E PLANOS FUTUROS

Neste trabalho foram apresentadas estruturas finas presentes em rádio emissões decimétricas solares registradas pelo BSS.

A morfologia destas emissões rádio identificada nos espectros dinâmicos suportam as hipóteses que são geradas por mecanismo de emissão de plasma, ou seja, a partir da interação de feixes de partículas aceleradas se propagando ao longo das estruturas magnéticas solares com o plasma da atmosfera solar confinado nestas estruturas. Permitindo fazer conjecturas sobre a própria geometria da configuração magnética nas regiões de aceleração e emissão e possibilitando estimar parâmetros da fonte emissora.

Desta forma, foi apresentada uma metodologia para a análise de estruturas finas com morfologia tipo U ou tipo J ou J invertido, baseada em trabalhos anteriores publicados na literatura. Utilizando tal metodologia foram analisadas 5 estruturas finas, 3 com morfologia tipo U e 2 tipo J invertido presentes na rádio-emissão solar decimétrica (950 - 2100 MHz), observadas pelo BSS entre junho de 2000 e outubro de 2001.

As características espectro-temporais de cada uma das 5 explosões foram medidas nos espectros dinâmicos. A partir das medidas obtidas foram determinados os principais parâmetros do agente e da fonte emissora. Os resultados obtidos mostram os seguintes intervalos de valores para os parâmetros determinados:

- a) densidade de fluxo da emissão:  $< (20 - 80)$  s.f.u.;
- b) densidade eletrônica:  $(5,5 - 14,2) \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$ ;
- c) comprimento do arco magnético:  $(0,3 - 5,1) \times 10^{10} \text{ cm}$ ;
- d) velocidade do feixe:  $(0,16 - 0,53) c$ ;
- e) temperatura do cume do arco magnético:  $(2,5 - 15,5) \times 10^6 \text{ K}$ ; e
- f) limite inferior para a intensidade do campo magnético:  $(7 - 22) \text{ G}$ .

A Figura 6.1 mostra um cenário esquemático de uma região ativa com a presença de arcos magnéticos em interação, na qual são identificados os valores correspondentes dos parâmetros

determinados no trabalho (listados acima) da região emissora e do feixes de elétrons acelerados.

Os valores obtidos estão de acordo com determinações relatadas anteriormente na literatura para explosões tipo U e suas variantes, como tipo J e tipo N, observadas na faixa decimétrica (1,0 – 6,0 GHz). Cabe ressaltar que, apesar da observação e do estudo das explosões solares em ondas de rádio não ser recente, as investigações baseadas em dados obtidos com altas resoluções espectrais e temporais, como as realizadas neste trabalho, certamente ainda trazem contribuições significativas para o melhor entendimento dos fenômenos solares explosivos.

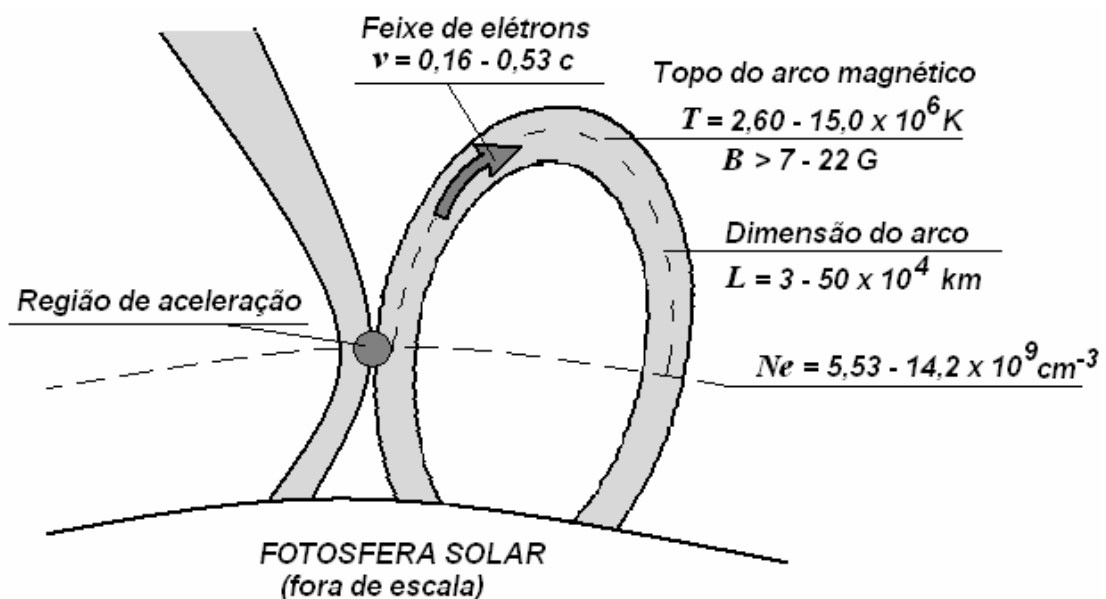


Figura 4.13 - Representação esquemática (fora de escala) de uma região ativa com a presença de arcos magnéticos em interação. São identificados os intervalos de valores dos parâmetros (velocidade do feixe de elétrons, temperatura no topo do arco, intensidade do campo magnético, comprimento do arco e densidade eletrônica) determinados a partir da análise das estruturas finas tipo U e tipo J.

Além dos resultados significativos de determinação dos parâmetros, o desenvolvimento do trabalho possibilitou ao autor conhecer o instrumento BSS, uma importante ferramenta observacional para a investigação de diversos fenômenos solares e que voltará a operar regularmente em Cachoeira Paulista no segundo semestre de 2010. Possibilitou também uma familiarização com os procedimentos de observação e com o pacote de análise dos dados (BSSView).

Portanto, cabe concluir que os objetivos estabelecidos no presente trabalho foram plenamente cumpridos. Além disso, a revisão dos principais conceitos teóricos e sobre a fenomenologia e a física das emissões rádio solares, que ocorrem em particular na faixa de ondas decimétricas e a descrição da metodologia utilizada na análise pode servir de base para formação de outros estudantes ingressantes na área.

### **6.1 Sugestões para trabalhos futuros**

Neste trabalho, diversas simplificações foram feitas para o cálculo dos parâmetros da fonte. Entre elas, as considerações a cerca da geometria semicircular adotada para a estrutura magnética, como feitas também por Yao et al. (1997a; 1997b) e Wang et al (2001a). Certamente, um cenário mais realista seria adotar uma geometria ajustando uma forma não exatamente semicircular, na qual os ramos ascendente e descendente formem um ângulo entre si.

Conforme mencionado, foram identificadas diversas outras estruturas finas (tipo III, J e U) para as quais pretende-se aplicar metodologias de análise semelhantes às aplicadas aqui a fim de melhorar a determinação dos parâmetros obtidos.

Além disso, considerando que as emissões decimétricas estão associadas a feixes de partículas aceleradas durante os “flares” e que viajam ao longo das linhas de campo magnético, imagens em rádio na faixa decimétrica são potencialmente importantes como diagnóstico. Desta forma, imagens com alta resolução espacial podem ser usadas na identificação da geometria do campo associado às fontes, como obtido por Aschwanden et al. (1992) com as imagens do VLA. Imagens desta natureza estarão disponíveis, através das observações com o “Brazilian Decimetric Array” (BDA), que pode estar operacional a partir de 2012 (SAWANT et al., 2003; SAWANT et al., 2005; SAWANT et al., 2007).

Através das observações interferométricas com o BDA, será possível obter imagens de regiões emissoras localizadas no limbo solar, possibilitando a determinação direta da altura da região de emissão.

Através de observações simultâneas destas emissões pelo BSS, será possível “calibrar” os atuais modelos de densidade (relação densidade eletrônica x altura na atmosfera solar) para a

faixa de ondas decimétricas (1 - 2 GHz) e obter determinações mais precisas do volume das regiões emisoras.

## REREFÊNCIAS

- ABALDE, J. R.; ALVES, M. V.; CHIAN, A. C.-L. Nonlinear generation of type III solar radio bursts by the hybrid modulational instability. **Astronomy and Astrophysics**, v. 331, p. L21-L24, 1998.
- ALLAART, M. A. F. et al. Fine structure in solar microwave bursts. **Solar Physics**, v. 130, p. 183-199, Dec. 1990.
- ASCHWANDEN, M. J. Particle acceleration and kinematics in solar flares - A Synthesis of Recent Observations and Theoretical Concepts. **Space Science Reviews**, v. 101, n. 1, p. 1-227, 2002.
- ASCHWANDEN, M. J. **Physics of the Solar Corona – an introduction**, Springer and Praxis, UK, 2004.
- ASCHWANDEN, M. J. et al. Correlation of solar decimetric radio bursts with X-ray flares. **Solar Physics**, v. 97, p. 159-172, May 1985.
- ASCHWANDEN, M. J. et al. Decimetric solar type bursts: VLA and PHOENIX observations. **Astrophysical Journal**, v. 391, p. 380-392, 1992.
- ASCHWANDEN, M. J.; BENZ, A. O.; MONTELLO, M. L. Coherent-phase or random-phase acceleration of electron beams in solar flares. **Astrophysical Journal**, v. 431, n. 1, p. 432-449, 1994.
- ASCHWANDEN, M. J. et al. Solar Electron Beams Detected in Hard X-Rays and Radio Waves. **Astrophysical Journal**, v. 455, p. 347, 1995.
- ASCHWANDEN, M. J.; BENZ, A. O. Electron Densities in Solar Flare Loops, Chromospheric Evaporation Upflows, and Acceleration Sites. **Astrophysical Journal**, v. 480, p. 825-839, 1997.
- AURASS, H.; KLEIN, K.-L.; MARTENS, P. C. H. First detection of correlated electron beams and plasma jets in radio and soft x-ray data. **Solar Physics**, v. 155, n.1, p. 203-206, 2004.
- AURASS, H., KLEIN, K.-L. Spectrographic and imaging observations of solar type U radio bursts. **Astronomy and Astrophysics Supplement Series**, v. 123, p. 279-304, Jun. 1997.
- BASTIAN, T. S.; BENZ, A. O.; GARY, D. E. Radio Emission from Solar Flares. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, v. 36, p. 131-188, 1998.
- BENZ, A. O. Radio Astronomical Diagnostics. **Lecture Notes in Physics**, v. 468, p. 213, 1996.
- BENZ, A. O. et al. Solar radio blips and X-ray kernels. **Nature**, v. 291, p. 210-211, May, 1981.
- BENZ, A. O.; BERNOLD, T. E. X.; DENNIS, B. R. Radio blips and hard X-rays in solar flares. **Astronomical Journal**, v. 271, p. 355-366, Aug. 1983.

BENZ, A. O et al. Electron beams in the low corona. **Solar Physics**, v. 141, n. 2, p. 335-346, 1992.

BOCZKO, R. **O Sol**. 2007. Disponível em <http://www.telescopiosnaescola.pro.br/ceu1/classica/sol.pdf>. Acesso em 22 set. 2009.

BOYD, T. J. M.; SANDERSON, J. J. **Plasma Dynamics**, London: Nelson, 1969. (Applications of mathematics series).

CECATTO, J. R et al. Decimetric Reverse Drift and U-Type Bursts in the April 9, 2001 Flare. **COSPAR Colloquia Series**, v. 13, p. 313, 2002.

CECATTO, J. R et al. High resolution time profile of decimetric type-III bursts. **Advances in Space Research**, v. 32, n. 12, p. 2533-2537, 2003.

CECATTO, J. R. et al. New site of the Brazilian Solar Spectroscope: survey and installation. In: ANDREI, Alexandre; KOSOVICHEV, Alexander; ROZELOT, Jean-Pierre . **Proc. IAU Symposium No. 264**. Solar and Stellar Variability Impact on Earth and Planets. Cambridge, Cambridge University Press, 2010. p. 484-486.

CHEN, F. F. **Introduction to plasma physics and controlled fusion**. Vol. 1: Plasma Physics. 2<sup>nd</sup> ed. New York, Plenum, 1983. 232 p.

CHRISTE, S. et al. The RHESSI Microflare Height Distribution. **Bulletin of the American Astronomical Society**, v. 41, p.846, 2009.

DRÖGE, F. Millisecond fine-structures of solar burst radiation in the range 0.2-1.4 GHz. **Astronomy and Astrophysics**, v. 57, n. 1-2, p. 285-290, May 1977.

DULK, G.A. Radio emission from the sun and stars. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, v. 23, p. 169-224, 1985.

DULK, G.A.; MCLEAN, D. J.; NELSON, G. J. Solar flares. In: MCLEAN, D. J.; LABRUM, N. R. Eds. **Solar radiophysics: Studies of emission from the sun at metre wavelengths**. Chapter 4. Cambridge and New York, Cambridge University Press, 1985, 527 p.

DUTRA, J. A. S. S.; GUARNIERI, F. L.; FERNANDES, F. C. R. Estruturas finas na radio emissão solar em ondas decimétricas: parâmetros e caracterização da região de aceleração. In: ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE PÓS-GRADUAÇÃO,8., out.2008, São José dos Campos, SP. **Anais...** São José dos Campos: UniVap, 2008.

DUTRA, J. A. S. S.; FERNANDES, F. C. R. Source parameters estimated from decimetric type-U solar bursts, **Advances in Space Research**, 2010 (em finalização).

FARIA, C. **Um sistema para tratamento e visualização de dados astronômicos espectrais**. Dissertação (Mestrado em Matemática e Computação Aplicada) INPE, São José dos Campos. INPE-8036/TDI 752, 1999.

FERNANDES, F. C. R. **Espectrógrafo Decimétrico de alta sensibilidade e resolução: análise preliminar das explosões solares**. Dissertação (Mestrado em Ciência Espacial) INPE, São José dos Campos. INPE-5537-TDI/525, 1992.



FERNANDES, F. C. R. **Espectrógrafo Digital Decimétrico de banda larga e investigações de flares solares em rádio e raios-X**. Tese (Doutorado em Astrofísica) INPE, São José dos Campos. INPE-6396-TDI/612, 1997.

FERNANDES, F. C. R. **Catálogo de espectros dinâmicos de explosões solares decimétricas registradas pelo Brazilian Solar Spectroscope (BSS)**: 1999. INPE-9654-RPQ/740, INPE, 2003a.

FERNANDES, F. C. R. **Catálogo de espectros dinâmicos de explosões solares decimétricas registradas pelo Brazilian Solar Spectroscope (BSS)**: 2000. INPE-9653-RPQ/739, INPE, 2003b.

FERNANDES, F. C. R. **Catálogo de espectros dinâmicos de explosões solares decimétricas registradas pelo Brazilian Solar Spectroscope (BSS)**: 2001. INPE-9652-RPQ/738, INPE, 2003c.

FERNANDES, F. C. R. **Catálogo de espectros dinâmicos de explosões solares decimétricas registradas pelo Brazilian Solar Spectroscope (BSS)**: 2002. INPE-9881-RPQ/742, INPE, 2003d.

FERNANDES, F. C. R.; SAWANT, H. S. Physical Parameters of the Exciter of the Decimetric Type III Bursts. In: BRAZILIAN MEETING ON PLASMA PHYSICS AND THE SIXTH BRAZILIAN PLASMA ASTROPHYSICS WORKSHOP,4., **Proceedings...** p. 125-128, 1996.

FERNANDES, F. C. R.; MELENDEZ MORENO, J. L.; SAWANT, H. S. Acceleration region of energetic particles associated with type III and X-ray bursts during solar flares. In: BRAZILIAN MEETING ON PLASMA PHYSICS,5., **Proceedings...** p. 357-360, 1998.

FERNANDES, F. C. R. et al. Brazilian Solar Spectroscope (BSS) e os problemas atuais da física solar. **Boletim da Sociedade Astronômica Brasileira**, v. 20, n. 2, p. 33-43, 2000a.

FERNANDES, F. C. R, et al. Investigations of the Acceleration Region of Energetic Electrons Associated with Decimetric Type III and X-Ray Bursts. **Advances in Space Research**, v. 25, n. 9, p. 1813-1816, 2000b.

FOKKER, A. D. Spectral Characteristics of Medium-Sized Solar Radio Events. **Solar Physics**, v. 8, n. 2, p.376-387, 1969.

FOKKER, A. D. Trajectories Followed by U-Like Solar Radio Bursts. **Solar Physics**, v. 11, n. 1, p.92-103, 1970.

FONTENLA, J. M .et al. Flaring arches. III - The subflare of June 27, 1980, and its related extended arch. **Solar Physics**, v. 134, p. 145-169, July, 1991.

FU, Q.-J. et al. A New Catalogue of Fine Structures Superimposed on Solar Microwave Bursts. **Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics**, v. 4, p. 176-188, 2004.

GOLDMAN, M. V. Progress and problems in the theory of type III solar radio emission. **Solar Physics**, v. 89, n. 2, p. 403-442, Dec. 1983.

GÜDEL, M., BENZ, A. O. A catalogue of decimetric solar flare radio emission. **Astronomy and Astrophysics Supplement Series**, v. 75, p. 243-259, 1988.

GUIDICE, D. A.; CASTELLI, J. P. The use of extraterrestrial radio sources in the measurement of antenna parameters. **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems**, v. 7, n. 2, p. 226-234, Mar. 1971.

HAISCH, B.; STRONG, K. T.; RODONO, M. Flares on the sun and other stars. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, v. 29, p. 275-324, 1991.

HARRA, L. K. Solar flares: the observations. **Memorie della Societa Astronomica Italiana**, v. 78, p. 236, 2007.

HOLMAN, G. D. Acceleration of runaway electrons and joules heating in solar flares. **Astrophysical Journal**, v. 293, n. 2, p. 584-594, 1985.

HUDSON, H. Solar flare discovery. **Solar Physics**, v. 113, n. 1-2, p. 1-9, 1987.

HUDSON, H.; RYAN, J. High-Energy Particles In Solar Flares. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, v. 33, p. 239-282, 1995.

ISLIKER, H.; BENZ, A. O. Catalogue of 1-3 GHz solar flare radio emission. **Astronomy and Astrophysics Supplement Series**, v. 104, p. 145 -160, 1994.

KAHLER, S. W. Solar flares and coronal mass ejections. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, v. 30, p. 113-141, 1992.

KANE, S. R. et al. Impulsive phase of solar flares. **Solar flares: A monograph from Skylab Solar Workshop II**. Boulder, Colorado, Colorado Associated University Press, p. 187-229, 1980.

KANE, S. R. et al. Energy Release and Dissipation during Giant Solar Flares. **Astrophysical Journal Letters**, v. 446, p. L47, 1995.

KARLICKÝ, M., TLAMICHA, A. The trajectories of U-type solar radio bursts. **Astronomical Institutes of Czechoslovakia Bulletin**, v. 27, n. 4, p. 223-226, 1976.

KARLICKÝ, M.; MANN, G.; AURASS, H. Transport of superthermal electrons in coronal loops and U(N)-type solar radio bursts. **Astronomy and Astrophysics**, v. 314, p. 303-311, 1996.

KOSUGI, T.; DENNIS, B. R.; KAI, K. Energetic electrons in impulsive and extended solar flares as deduced from flux correlations between hard X-rays and microwaves. **Astrophysical Journal**, v. 324, p. 1118-1131, Jan. 1988.

KUNDU, M. R. **Solar radio astronomy**, John Wiley & Sons, Inc. 1965.

KUNDU, M. R. Physics of the impulsive phase of solar flares. **Advances in Space Research**, v. 2, n. 11, p. 159-176, 1982.

KUNDU, M. R.; VLAHOS, L. Solar microwave bursts - A review. **Space Science Reviews**, v. 32, n. 4, p. 405-462, 1982.

MARTINON, A. R. F. **BSSData - um programa otimizado para tratamento e análise de dados em radioastronomia solar**. Dissertação (Mestrado em Matemática e Computação Aplicada) São José dos Campos, INPE, 2003.

MASUDA, S. et al A loop-top hard X-ray source in a compact solar flare as evidence for magnetic reconnection. **Nature**, v. 371, n. 6497, p. 495-497, 1994.

MASUDA, S. et al. Hard X-Ray Sources and the Primary Energy-Release Site in Solar Flares **Publication of Astronomy Society of Japan**, v. 47, n. 3, p. 677-689, 1995.

MCLEAN, D. J. Metrewave solar radio bursts. In: MCLEAN, D. J.; LABRUM, N. R. Eds. **Solar radiophysics: Studies of emission from the sun at metre wavelengths**. Chapter 3. Cambridge :Cambridge University Press, 1985.

MELLENDEZ MORENO, J. L. **Explosões solares decimétricas tipo III associadas com a fase impulsiva do "flare" solar**. 1997. 134 p. (INPE-6382-TDI/601). Dissertação (Mestrado em Astrofísica) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Sao Jose dos Campos. 1997.

MELLENDEZ MORENO, J. L. et al. Statistical analysis of high-frequency decimetric type III bursts. **Solar Physics**, v.187, p. 77-88, 1999.

MELROSE, D. B. Plasma emission mechanisms. In: MCLEAN, D. J.; LABRUM, N. R. Eds. **Solar radiophysics: Studies of emission from the sun at metre wavelengths**. Chapter 8. p. 177-210. Cambridge and New York, Cambridge University Press, 1985.

MELROSE, D. Solar flares - Current dissipation or magnetic annihilation? **Australian Journal of Physics**, v. 46, n. 1, p. 167-193, 1993.

MÉSZÁROSOVÁ, H. et al. Solar decimetric type III bursts in semi-closed magnetic field structures. **Astronomy and Astrophysics**, v. 484, n. 2, p. 529-536, 2008.

MOORE, R. et al. **Solar flares: A monograph from Skylab Solar Workshop II**. Boulder, Colorado, Colorado Associated University Press, p. 341-409, 1980.

NING, Z. J. et al. Solar partial N-burst. **Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics**, v. 3, n 4, p. 381-390, 2003.

NING, Z. et al. Microwave type III bursts and pulsation groups. **Astronomy and Astrophysics**, v. 437, n. 2, p.691-697, July 2005.

OHYAMA, M.; SHIBATA, K. X-Ray Plasma Ejection Associated with an Impulsive Flare on 1992 October 5: Physical Conditions of X-Ray Plasma Ejection. **Astrophysical Journal**, v. 499, p. 934, 1998.

OHYAMA, M.; SHIBATA, K. X-ray Plasma Ejection Associated with H $\alpha$  Filament Eruption. **Proceedings of Nobeyama Symposium**, NRO Report 479, p. 367-370, 1999.

OLIVEIRA, K. S.; SARAIVA, M. F. O. **Astronomia e Astrofísica**. 2.ed. São Paulo: Editora Livraria da Física. 2004.

PICK, M.; KLEIN, K. L.; TROTTER, G. Meter-decimeter and microwave radio observations of solar flares. **The Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 73, p. 165-175, Jun. 1990.

ROBINSON, P. A.; BENZ, A. O. Bidirectional Type III Solar Radio Bursts. **Solar Physics**, v. 194, n. 2, p. 345-369, 2000.

ROSNER, R., TUCKER, W. H, VIANA, G. S. Dynamics of the quiescent solar corona. **The Astrophysical Journal**, v. 220, p. 643-665, 1978.

RUST, D. M.; SIMNETT, G. M.; SMITH, D. F. Observational evidence for thermal wave fronts in solar flares. **Astrophysical Journal**, v. 288, p. 401-409, Jan., 1985.

SAWANT, H. S. et al Low-level decimetric (1.6 GHz) solar burst activity. **Solar Physics**, v. 111, n. 1, p. 189-199, 1987.

SAWANT, H. S. et al. High Sensitivity, High Frequency and High Time Resolution Decimetric Spectroscop. **Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica**, 21, 651, 1990a.

SAWANT, H. S. et al Hard X-rays and associated weak decimetric bursts. **Solar Physics**, v. 130, p. 57-73, 1990b.

SAWANT, H. S. et al High Sensitivity Digital Decimetric Spectroscop. **Advances in Space Research**, v. 13, n. 9, p. 199-202, 1993.

SAWANT, H. S.; FERNANDES, F. C. R.; NERI, J. A. C. F. Microwave type III-RS bursts. **Astrophysical Journal Supplement Series**, v. 90, n. 2, p. 689-691, 1994.

SAWANT, H. S. et al. High sensitivity wide band digital solar polarimetric spectroscop. **Advances in Space Research**, v. 17, n. 4/5, p. 385-388, 1996.

SAWANT, H. S. et al Data acquisition and recent results of the Brazilian Solar Spectroscop - BSS. **Astronomical Society of Pacific Conference Series**, v. 206, p. 347-350, 2000.

SAWANT, H. S. et al. Brazilian Solar Spectroscop (BSS). **Solar Physics**, v. 200, n.1-2, p.167-176, 2001.

SAWANT, H. S. et al. A low cost steerable radio-telescope. **Advances in Space Research**, . 32, n. 12, p. 2715-2720, 2003.

SAWANT, H. S. et al Brazilian Decimetric Array In: INTERNATIONAL UNION OF RADIO SCIENCE - URSI GA2005, 28., Oct. 23-29, 2005, (NewDelhi, India). General Assembly - **Proceeding ...**, New Delhi, 2005.

SAWANT, H. S. Et Al. BDATeam. Brazilian Decimetric Array (PHASE-I). **Solar Physics**, v. 242, p. 213-220, 2007.

SAWANT, H. S. et al. Highlights of the Brazilian Solar Spectroscop. **Advances in Space Research**, v. 44, p. 54-57, 2009.

SGD – **Solar-Geophysical Data prompt reports**. Number 677, Part 1, January, 2001. Disponível em: <http://www.ngdc.noaa.gov.stp>. Acesso em 2008.

SILVA, A.V.R., **Nossa Estrela: o Sol**. 1ª ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2006.

STÄHLI, M.; BENZ, A. O. Microwave emission of solar electron beams. **Astronomy and Astrophysics**, v. 175, n. 1-2, p. 271-276, Mar. 1987.

STONE, R. G., FAINBERG, J. A U-Type Solar Radio Burst Originating in the Outer Corona. **Solar Physics**, v. 20, p. 106-111, 1971.

STURROCK, P. A. Introduction to Solar Flares. **Solar flares: A monograph from Skylab Solar Workshop II**. Boulder, Colorado, Colorado Associated University Press, p. 1-16, 1980.

SUZUKI, S.; DULK, G. A. Bursts of Type III and Type V. In: MCLEAN, D. J.; LABRUM, N. R. Eds. **Solar radiophysics: Studies of emission from the sun at metre wavelengths**. Chapter 12. Cambridge : Cambridge University Press, 1985.

SVESTKA, K. **Solar Flares**. Dordrecht: D. Reidel, 1976. 400p.

TANDBERG-HANSEN, E.; EMSLIE, A. G. **The physics of solar flares**. Cambridge: Cambridge University Press, 1988, 286 p.

TSUNETA, S. et al. Observation of a solar flare at the limb with the YOHKOH Soft X-ray Telescope. **Publication of Astronomical Society of Japan**, v. 44, n. 5, p. L63-L69, 1992.

VLAHOS, L. Particle acceleration in solar flares. **Solar Physics**, v. 121, n. 1-2, p. 431-447, 1989.

VLAHOS, L. Microflares: Theory and modeling. In: FLARE 22 WORKSHOP, DYNAMICS OF SOLAR FLARES. **Proceedings...** Chantilly, France: DASOP Observatoire de Paris. 1990.

WANG, M. et al. Observations of Microwave Type-U Bursts. **Solar Physics**, v. 199, p. 157-164, 2001a.

WANG, M. et al. Centimetric type N and type M bursts. **Astronomy and Astrophysics**, v. 380, p. 318-322, 2001b.

WILD, J. P.; SMERD, S. F.; WEISS, A.A. Solar Bursts. **Annual Review of Astronomy and Astrophysics**, v. 1, p. 291, 1963.

XU, F. et al. Some Observed Results of Solar Radio Spectrometer at 4.5-7.5 GHz **Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics**, v. 1, p. 469, 2001.

YAO, J. et al. A solar type U burst in the decimetric range. **Advances in Space Research**, v. 20, n. 12, p. 2351-2354, 1997a.

YAO, J.-X. et al., Analysis of a solar decimetric U-type burst. **Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics**, v. 21, n 2, p. 221-228, 1997b.

ZHELEZNYAKOV, V. V.; ZAITSEV, V. V. Contribution to the theory of type III solar radio bursts. I. **Soviet Astronomy**, v. 14, n. 1, p. 47-58, July-Aug. 1970.

ZIRIN, H. **Astrophysics of the sun**. Cambridge and New York, Cambridge University Press, 1988, 440 p.

## APÊNDICE A - CALIBRAÇÃO EM DENSIDADE DE FLUXO

Os dados das observações solares realizadas pelo BSS são registrados em unidades de intensidade arbitrárias. Posteriormente, os dados relativos às explosões são calibrados em unidades de densidade fluxo solar, s.f.u. ( $1 \text{ s.f.u.} = 10^{-22} \text{ W/Hz m}^2$ ).

O procedimento de calibração em intensidade envolve os seguintes passos:

- Utilizando o analisador de espectros, que faz a varredura do sinal proveniente da antena, é feito um registro com diferentes níveis de atenuação, que é digitalizado em um arquivo de dados. Geralmente, faz-se variar o nível de referência do sinal de 1 a 9 dBm (de 1 em 1 dB), conforme mostra a Figura A.1.
- Cria-se uma escala de valores de intensidade em unidades arbitrárias, baseada nestes níveis de referência.
- Faz-se uma calibração desta escala através de dados de densidade de fluxo do Sol calmo, interpolados a partir de dados de fluxo em outras frequências, obtidos via Internet.

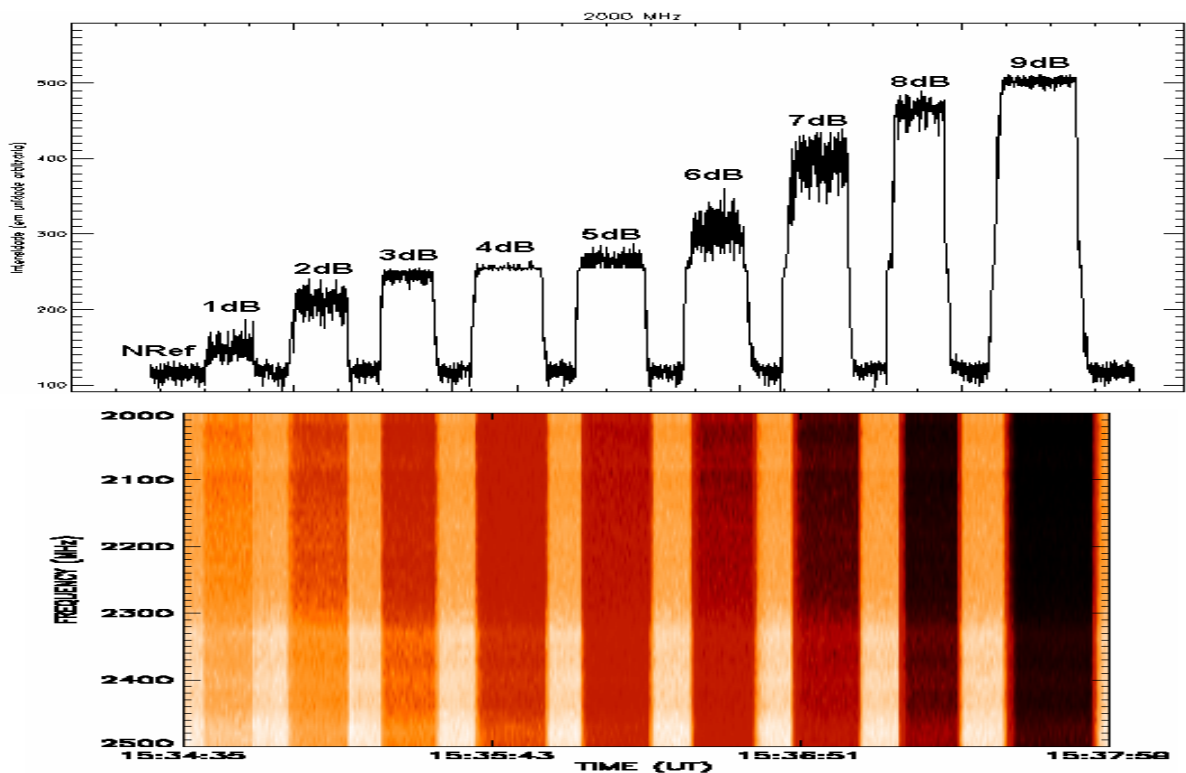


Figura A.1 - Registros da calibração em intensidade feita pela variação do nível de referência de 1 a 9 dB: perfil temporal (acima) e espectro dinâmico (abaixo).

A densidade de fluxo do solar calmo ("background"),  $S_o$ , numa dada frequência  $f$ , de cada um dos canais da banda de observação do BSS, pode ser calculada pelo método de calibração de antena proposto por Guidice e Castelli (1971) através da expressão

$$S_o(f) = \left[ \frac{S(f_a)}{S(f_b)} \right]^{\Phi(f)} \times S(f_a) ,$$

em que,

$$\Phi(f) = \frac{\log(f / f_a)}{\log(f_a / f_b)} ,$$

sendo a frequência  $f$ , intermediária às frequências  $f_a$  e  $f_b$ , cujas densidades de fluxo são expressas por  $S(f_a)$  e  $S(f_b)$ , respectivamente. Os valores de  $f_a$ ,  $f_b$  e suas respectivas densidades de fluxo médias em s.f.u. (unidades de fluxo solar) para um dado dia de observação, são extraídos de sites na Internet, como, por exemplo, do SGD (Figura A.2).

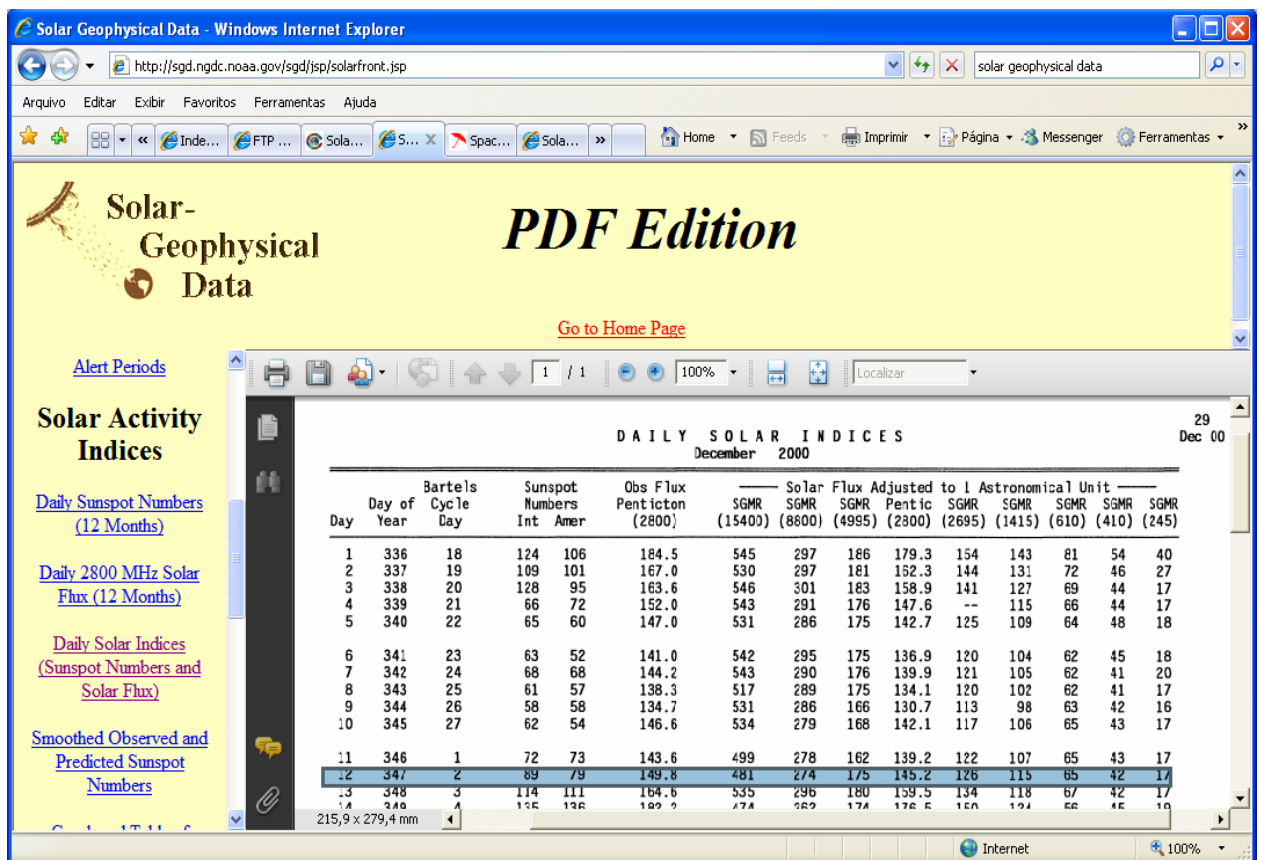


Figura A.2 – Fragmento da tela da homepage do “Solar Geophysical Data”, que fornece a intensidade de fluxo diária para diferentes frequências.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)



[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)