



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

INPE-5538-TDI/526

**ESTUDO DE EXPLOSÕES SOLARES IMPULSIVAS  
OBSERVADAS COM ALTA RESOLUÇÃO ESPECTRAL  
NA FAIXA DE 18 A 23 GHz**

Reinaldo Roberto Rosa

Dissertação de Mestrado em Ciência Espacial/Radioastronomia  
e Física Solar, orientada pelo Dr. Hanumant S. Sawant,  
aprovada em março de 1992.

INPE  
São José dos Campos  
Abril de 1992

**Publicado por:**

**Coordenação de Ensino, Documentação e  
Programas Especiais - CEP**

**Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE**

**Caixa Postal 515**

**12201-970 - São José dos Campos - SP - Brasil**

**Fone: (012) 345.6911**

**Fax: (012) 345.6919**

**E-Mail: [marciana@sid.inpe.br](mailto:marciana@sid.inpe.br)**

- Solicita-se intercâmbio
- We ask for exchange
- Si sollecita intercambio
- On demande l'échange
- Mann bittet un Austausch
- Pídesse canje
- Просим обмен
- 歡迎者交換
- 出版物交換のお願い

**Publicação Externa - É permitida sua reprodução para interessados.**

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-5538-TDI/526

**ESTUDO DE EXPLOSÕES SOLARES IMPULSIVAS  
OBSERVADAS COM ALTA RESOLUÇÃO ESPECTRAL  
NA FAIXA DE 18 A 23 GHz**

Reinaldo Roberto Rosa

Dissertação de Mestrado em Ciência Espacial/Radioastronomia  
e Física Solar, orientada pelo Dr. Hanumant S. Sawant,  
aprovada em março de 1992.

INPE  
São José dos Campos  
Abril de 1992

523.985

ROSA, R.R.

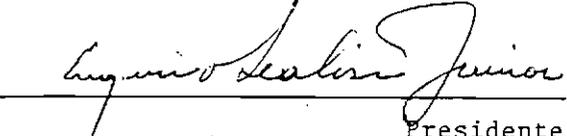
Estudo de explosões impulsivas observadas  
com alta resolução espectral na faixa de 18  
a 23 GHz / R.R. Rosa. -- São José dos Campos  
: INPE, 1992.

128p. - (INPE-5538-TDI/526)

1. Explosão solar. 2. Microondas. I. Título.

Aprovada pela Banca Examinadora  
em cumprimento a requisito exigido  
para a obtenção do Título de Mestre  
em Ciência Espacial

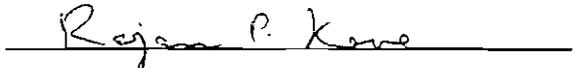
Dr. Eugenio Scalise Júnior

  
\_\_\_\_\_  
Presidente

Dr. Hanumant Shankar Sawant

  
\_\_\_\_\_  
Orientador

Dr. Rajaram Purushottam Kane

  
\_\_\_\_\_  
Membro da Banca

Dr. Jacques Raymond Daniel Lépine

  
\_\_\_\_\_  
Membro da Banca  
- Convidado -

Candidato: Reinaldo Roberto Rosa

São José dos Campos, 06 de março de 1992

*Tudo é mistério  
e tudo está  
cheio de significado*

*Fernando Pessoa*

Dedico este trabalho ao assessor da  
Fundação de **Amparo** à Pesquisa do Estado  
de São Paulo (FAPESP), relator do  
parecer referente ao processo  
91/1635-9.

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Hanumant Shankar Sawant pela amizade, apoio e orientação durante a realização desta pesquisa.

Ao Dr. Brian Dennis (NASA), pelos perfis temporais das explosões solares observadas em raios X duros pelo HXRBS/SMMS.

Ao Dr. Gary Hurford (Caltech), pelos dados das explosões no intervalo de 1-18 GHz.

Ao Dr. V.P. Nefydev, pelos dados relativos aos flares solares observados em 1989.

À equipe técnica do Rádio Observatório de Itapetinga, pelo desenvolvimento do sistema, em especial ao Rubens pelo apoio constante.

Ao Daniel Martinazzo e José Ângelo Neri pelo desenvolvimento do software e interface de digitalização.

Ao J.R. Cecatto pelas observações solares no ROI, nos períodos relativos ao ano de 1989.

Ao Dr. Eugênio Scalise Jr. e Dr. R. Kane pelas discussões e apoio prestados.

Ao pessoal da Divisão de Astrofísica do INPE, pela atenção e apoio dispensados, principalmente às secretárias Dalva, Eliana e Ivone.

Aos colegas pós-graduandos, que, de uma maneira ou de outra, contribuíram indiretamente para a conclusão deste trabalho.

Ao Guga (*the Best*), Cecatto e Josimar Lopes Ribeiro pela fundamental contribuição na fase conclusiva deste trabalho.

Aos pesquisadores Ivo C. Busko e Eurico R. de Paula pelas discussões e apoio na fase de revisão desta dissertação, incluindo Jeane e Cristiane pela assessoria amiga e fundamental.

Um agradecimento especial aos amigos e familiares mais chegados, e à minha mais autêntica inspiração: *chatte Lenise*, que souberam compreender as horas e os dias de ausência.

Finalmente, ao CNPq, pelo suporte financeiro.

## RESUMO

Pela primeira vez, explosões solares na faixa de frequência de 18 a 23 GHz foram observadas com resolução temporal de 0,6 segundos e resolução em frequência de 1 GHz, utilizando a antena de 13,7 metros de diâmetro do Rádio Observatório do Itapetinga. Estudamos as "explosões simples" em microondas associadas à fase impulsiva dos "flares" solares. Analisamos os espectros das explosões de baixa intensidade (densidade de fluxo < 100 SFU) para a investigação dos: *i*) processos de aceleração (impulsivo ou contínuo) dos elétrons emissores e *ii*) mecanismos de emissão *gyrosynchrotron* (térmico ou não-térmico). Esta análise sugeriu que o processo de aceleração dos elétrons emissores é *impulsivo* (com um tempo de aceleração da ordem de 1 segundo) e que o mecanismo de emissão desses elétrons é não-térmico (com energia da ordem de 100 keV). Estimamos o espectro teórico em microondas que concordou, dentro de  $\approx 70\%$ , com o espectro médio observado, sugerindo que as explosões simples de baixa intensidade podem estar associadas às "injeções discretas de elétrons". Também estimamos os parâmetros típicos para a fonte da emissão de microondas sugerindo que essas explosões são geradas em uma região densa da cromosfera onde o nível de densidade eletrônica é da ordem de  $10^{10} \text{ cm}^{-3}$  com um campo magnético de  $\approx 300$  Gauss.

**STUDIES OF IMPULSIVE SOLAR BURSTS OBSERVED WITH  
HIGH SPECTRAL RESOLUTION IN THE RANGE OF 18-23 GHz**

**ABSTRACT**

For the first time solar burst in the frequency range of 18-23 GHz have been observed with high time (0.6-1.2 sec) and high frequency resolution (1 GHz) since 1989, by using the Itapetinga 13.7 m diameter antenna. Here, we have investigated the microwave type "simple low level (<100 SFU) bursts" associated with impulsive phase of solar flares. Observed properties of these simple bursts are: rise time  $t_r \approx 3$  s, decay time  $t_d \approx 8$  s and spectral index ranging between -1 and -4. These bursts were found to be associated with SF or SN flares as seen in H $\alpha$ . Above properties suggest that they are likely to be a microwave counterpart of *Elementary Flare Bursts (EFB)*. In the majority of the cases the spectral evolution is *soft-hard-soft*. This suggests that a nonthermal gyrosynchrotron mechanism is a likely mechanism for generating these Elementary Flare Bursts. Estimated parameters of these simple burst source are height ( $h \approx 2400$  km), electron density ( $N < 8,8 \times 10^9$  cm<sup>-3</sup>) and magnetic field ( $B \approx 310$  Gauss).

## SUMÁRIO

	Pág.
LISTA DE FIGURAS.....	xviii
LISTA DE TABELAS.....	xxii
<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 - Investigações teóricas sobre a emissão solar em microondas.....	3
1.2 - Primeiras observações de explosões solares em microondas para estudos espectrais.....	6
1.3 - Estudo de explosões solares observadas com alta resolução e alta sensibilidade.....	9
1.4 - O problema.....	12
<b>CAPÍTULO 2 - INSTRUMENTAÇÃO E OBSERVAÇÕES.....</b>	<b>15</b>
2.1 - Introdução.....	15
2.2 - Radiômetro de frequência variável.....	18
2.3 - Sistema de aquisição de dados.....	20
2.4 - Parâmetros do radiômetro e calibração do sistema.....	24
2.5 - Calibração do sinal durante a observação.....	29
2.6 - Sensibilidade como função da atividade da fonte.....	29
2.7 - Procedimento observacional.....	32
2.8 - Períodos observacionais.....	35
2.9 - Explosões observadas disponíveis para tratamento.....	38
<b>CAPÍTULO 3 - ANÁLISE DAS EXPLOSÕES SOLARES (18-23 GHz).....</b>	<b>41</b>
3.1 - Critérios de seleção e classificação das explosões.....	41
3.1.1 - Critérios básicos de seleção.....	41
3.1.2 - Critérios de seleção por correlação.....	43

3.1.2.1 - Primeiro critério de correlação.....	43
3.1.2.2 - Segundo critério de correlação.....	45
3.1.3 - Critério alternativo de seleção.....	46
3.2 - Explosões impulsivas do tipo simples.....	49
3.3 - Análise espectral.....	52
3.3.1 - Considerações sobre as barras de erro $\Delta\beta$ .....	55

#### CAPÍTULO 4 - ESTUDOS DAS EXPLOSÕES SOLARES IMPULSIVAS

(18-23 GHz).....	57
4.1 - Estudos das explosões (18-23) associadas com raios X duros.....	57
4.1.1 - Energias dos elétrons emissores.....	57
4.1.2 - Relações entre os índices espectrais.....	61
4.2 - Estudo semiquantitativo da evolução temporal do índice espectral.....	64
4.2.1 - Comportamento espectral durante a injeção dos elétrons emissores.....	64
4.2.2 - Razão de endurecimento do índice espectral.....	65
4.3 - Estudo semiquantitativo do espectro e da fonte da emissão.....	68
4.3.1 - Formulação e fluxogramas.....	68
4.3.1.1 - Considerações sobre o parâmetro $\theta$ .....	70
4.3.1.2 - Estimativa do valor de $\delta$ .....	71
4.3.1.3 - Estimativa da dimensão linear da fonte.....	71
4.3.1.4 - Considerações sobre o número de harmônicos e o campo magnético.....	71
4.3.1.5 - Estimativa da densidade de elétrons emissores.....	72
4.3.1.6 - Consideração sobre o valor da temperatura da região emissora.....	73
4.3.1.7 - Estimativa da frequência de colisão da distribuição térmica de elétrons.....	74
4.3.1.8 - Campo elétrico acelerador dos elétrons emissores...	75

4.3.2 - Valores dos parâmetros associados à fonte e ao espectro.....	80
<b>CAPÍTULO 5 - DISCUSSÕES E CONCLUSÕES.....</b>	<b>83</b>
5.1 - Interpretação das características espectrais observadas	83
5.1.1 - Frequência de pico ( $f_p$ ).....	83
5.1.2 - Índice espectral ( $\beta$ ).....	84
5.1.3 - Estruturas finas nos espectros.....	84
5.2 - Interpretação do espectro calculado.....	85
5.3 - Discussão sobre os valores estimados para a fonte de emissão.....	88
5.4 - Conclusões.....	91
5.5 - Sugestões e trabalhos futuros.....	92
5.5.1 - Tratamento individualizado das explosões impulsivas do tipo simples.....	92
5.5.2 - Estudo dos mecanismos de emissão das explosões do tipo peculiar.....	92
5.5.3 - Estudo mais criterioso dos espectros com estruturas finas em frequência.....	92
5.5.4 - Estudos correlativos entre microondas e raios-X duros.	92
5.5.5 - Estudo do nível de significância e da variabilidade do sinal.....	93
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>95</b>
<b>APÊNDICE A - Levantamento da correlação com H<math>\alpha</math> e microondas..</b>	<b>101</b>
<b>APÊNDICE B - Software para digitalização dos dados.....</b>	<b>107</b>
<b>APÊNDICE C - Ajuste da melhor reta para o espectro.....</b>	<b>111</b>

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
1.1 - Representação esquemática das diferentes fases de um <i>flare solar</i> , como observado desde as ondas de rádio até a emissão de partículas (Kane, 1974).....	02
1.2 - Espectro teórico para a emissão <i>gyrosynchrotron</i> , onde $\beta$ é o índice espectral e $f_p$ a frequência de pico correspondente à máxima densidade de fluxo $S_{max}$ .....	03
1.3 - Variação temporal do espectro para a explosão solar do dia 07/7/1966, onde $t$ é a diferença em minutos em relação a $t = 0$ (00 37.5 TU). (Takakura, 1972).....	06
1.4 - Principais tipos de espectros para as explosões solares em microondas, conforme a classificação de Guidice e Castelli (1975).....	07
1.5 - Evolução temporal do espectro de uma explosão solar observada com alta resolução espectral pelo grupo do OVRO, (Hurford, 1982).....	10
1.6 - Tipos de espectros de explosões solares observadas com alta resolução espectral pelo grupo do OVRO. (a) <i>tipo simples</i> , (b) <i>tipo banda estreita</i> , (c) <i>tipo banda larga</i> e (d), (e) e (f) do <i>tipo complexo</i> . (Stahli et al, 1989).....	11
1.7 - Evolução temporal do espectro para a explosão solar observada em 18/7/1981 com alta resolução espectral pelo grupo do OVRO. (Stahli et al, 1989).....	11
2.1 - Ciclo solar número 22 comparado com ciclos anteriores, conforme publicado no Solar Max Mission Bulletin no 7, da NOAA, USA.....	17
2.2 - Diagrama de blocos da instrumentação atual disponível no ROI, para observações solares, utilizando o radiômetro de frequência variável operando na faixa de 18 a 23 GHz.....	19
2.3 - Formato dos dados obtidos com o radiômetro de frequência variável (18-23 GHz), como monitorados pelo osciloscópio..	21

2.4 - Sinal mostrando o efeito "hatch" correspondente ao tempo estabilização do oscilador YIG.....	22
2.5 - Perfil temporal digitalizado (18-23 GHz) associado com o perfil temporal digitalizado em raios X duros para o mesmo evento observado pelo HXRBS/SMM.....	23
2.6 - Largura de meia potência do feixe da antena (ROI) em função da frequência, tomado em ELevação (a) e AZimute (b)	27
2.7 - Curva de calibração digitalizada em unidades relativas de fluxo (URF), realizada em 30/6/1989 na frequência de 20 GHz. Onde temos o "sinal do LOAD" (L), o "sinal do NOISE SOURCE (NS)" e o "sinal da região ativa" (RA).....	30
2.8 - Curvas de sensibilidade como função da porcentagem de temperatura da região ativa, levando em consideração a temperatura do ruído. A linha tracejada foi obtida para $\tau$ igual a 200 ms e a linha cheia para $\tau$ igual a 100 ms.....	31
2.9 - Mapa solar na frequência de 22 GHz, obtido no ROI em sua forma digitalizada.....	33
2.10- Mapa solar na frequência de 22 GHz, obtido no ROI, processado no seu formato analógico, composto por <i>isofotas</i>	34
2.11- Distribuição dos períodos de observações solares, com resolução temporal de 0,6 ou 1,2 segundo, na faixa de 18 a 23 GHz.....	37
2.12- (a) Perfil temporal adulterado devido à falha mecânica do gravador durante a digitalização; (b) Perfil temporal "atenuado" pelo observador durante a explosão.....	39
3.1 - Perfil temporal de uma explosão com duração definida pelo envoltório neperiano, onde $t_s$ é o tempo de subida (ou aumento) e $t_d$ é o tempo de descida (ou decaimento).....	42
3.2 - Perfil temporal em 19 GHz correlacionado com perfil tempo temporal em raios X (32-63 keV), para o evento observado em 15/6/1989, 19 12:15 TU.....	44
3.3 - Espectro característico de emissão <i>gyrosynchrotron</i> , construído com as densidades de fluxo de 18 a 23 GHz juntamente com as densidades de fluxo medidas em outras frequências, para a explosão do dia 14/6/1989, $\approx$ 12:50 TU.	45

3.4 - (a) Perfis temporais (18 a 23 GHz) para a explosão do dia 14/6/1989 ( $\approx$ 18:59 TU); (b) espectro obtido a partir das densidades de fluxo máximas medidas nos perfis temporais da figura (a), onde $S_1$ , $f_1$ , $S_2$ e $f_2$ são valores escolhidos para o cálculo do índice espectral $\beta$ .....	47
3.5 - Distribuições das explosões em função dos valores absolutos dos seus índices espectrais $\beta$ , onde o histograma hachurado corresponde às explosões selecionadas apenas pelos critérios básicos de seleção, e o não-hachurado àquelas selecionadas pelos critérios de correlação.....	48
3.6 - Tipos de perfis temporais das explosões solares impulsivas observadas na faixa de 18 a 23 GHz. (a) tipo $S_1$ , (b) tipo $S_2$ , (c) tipo $S_2F$ , (d) tipo C e (e) tipo P.....	50
3.7 - Perfis temporais para a explosão solar observada no dia 18/6/89 ( $\approx$ 18 59 TU), com o radiômetro (18-23 GHz). São tomadas medidas de fluxo para cinco instantes diferentes, em cada frequência.....	53
3.8 - Evolução temporal do espectro para a explosão solar da figura anterior. Onde $\uparrow$ significa a parte de aumento nos espectros de linha tracejada ( $t_1=1859:45$ , $t_2=1859:49$ TU); $\blacksquare$ significa o tempo de pico no espectro de linha cheia ( $t_3=18 59:50$ TU); e $\square$ significa a parte de decaimento no espectro de linha pontilhada ( $t_4=18 59:55$ , $t_5=19 00:00$ TU)	54
3.9 - Evolução temporal do índice espectral obtido a partir dos espectros da Figura 3.8.....	55
3.10- Curvas de evolução temporal do índice espectral para 16 explosões impulsivas do tipo simples. Numeradas conforme dispostas na Tabela 3.1.....	56
4.1 - Perfis temporais para um evento em raios X duros detectado desde o canal de 52-61 keV até o canal de 102-144 keV, em 14/6/1989 pelo HXRBS / SMMS.....	59
4.2 - Distribuição das explosões de raios X duros em função dos vários canais de energias em que foram detectados.....	60

4.3 - Curvas características da emissão <i>giromagnética</i> , para os casos térmico e não-térmico. Adaptada do artigo de Dulk e Marsh, 1982.....	62
4.4 - Valores dos índices espectrais $\delta_\gamma$ (□) e $\delta_\beta$ (■), para os sete eventos da Tabela 4.1.....	64
4.5 - Curva do comportamento do módulo do índice espectral $\beta$ durante uma explosão solar quando o processo de aceleração dos elétrons é <i>impulsivo</i> .....	66
4.6 - Montagem descritiva para a determinação da <i>largura de endurecimento (D)</i> sobre o perfil da evolução temporal do módulo do índice espectral $\beta$ .....	67
4.7 - Fluxograma para estimativa da frequência de pico em GHz...	77
4.8 - Fluxograma para estimativa da densidade de fluxo em UFS...	78
4.9 - Fluxograma para estimativa do campo elétrico em statvolt por centímetro.....	79
5.1 - Histogramas para as frequências de pico observadas: <i>i</i> ) na faixa de 1 a 18 GHz por Sthali et al (1989) (curva não hachurada) e <i>ii</i> ) na faixa de 18 a 23 GHz pelo grupo de física solar do INPE (curva hachurada).....	83
5.2 - Espectro calculado a partir do Fluxograma 4.2.....	86
5.3 - Campo espectral destacando as <i>faixas de consistência</i> entre os espectros médios calculado e observado. As siglas FBC, FMC e FBC representam, respectivamente, a Faixa de Baixa Consistência(não hachurada), a Faixa de Média Consistência (hachurado mais largo) e a Faixa de Alta Consistência (hachurado mais estreito).....	87
5.4 - Possível cenário para a emissão solar explosiva na faixa de 18 a 23 GHz, considerando uma fonte homogênea de elétrons não-térmicos.....	89

## LISTA DE TABELAS

	Pág.
1.1 - Resumo das características dos principais tipos de explosões solares em microondas, observadas até o início da década de 80. Adaptada de Dulk, 1985.....	08
2.1 - Instrumentação atual disponível no mundo, para observação solar em microondas.....	16
2.2 - Largura do feixe da antena de 13,7 metros do ROI.....	26
2.3 - Área efetiva da antena de 13,7 metros do ROI.....	28
2.4 - Temperatura absoluta do receptor milimétrico.....	28
2.5 - Temperatura da fonte de ruído "NOISE-COM".....	28
3.1 - Explosões solares impulsivas selecionadas.....	51
4.1 - Explosões solares em microondas e raios X correlacionadas	58
4.2 - Relações entre os índices espectrais $\gamma$ , $\beta$ e $\delta$ .....	63
4.3 - Casos extremos para o número de harmônicos da emissão....	72
5.1 - Valores médios esperados e estimados para os parâmetros associados com as explosões impulsivas do tipo simples na faixa de 18 a 23 GHz.....	89
A.1 - Códigos para importância óptica do flare.....	93
A.2 - Códigos para o campo magnético local.....	94
A.3 - Estações observadoras nas frequências de rádio.....	95
C.1 - Valores obtidos a partir da subrotina <i>Fitting Data to a Straight Line</i> .....	102

## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

Um *flare* solar geralmente é entendido como um conjunto extenso de fenômenos eruptivos com liberação de energia da ordem de  $10^{21}$  a  $10^{25}$  Joules, caracterizado por três fases de evolução: a fase precursora, a fase impulsiva (menor duração e maior taxa de energia liberada) e a fase estendida ou gradual (Figura 1.1).

As *Explosões Solares Impulsivas* são aquelas associadas à fase impulsiva dos *flares* solares, sendo observadas desde a faixa de rádio até a faixa de raios gama. A importância dos estudos multiespectrais das explosões impulsivas foi bem discutida durante o *Skylab Workshop on the Solar Flares* (Sturrock, 1980).

Um aspecto relevante da emissão impulsiva de microondas ( $f > 1\text{GHz}$ ) é que apresenta seus perfis temporais bem correlacionados, em tempo e intensidade, com os perfis temporais da emissão impulsiva em raios-X duros (energias  $> 20\text{ keV}$ ). Essas similaridades sugerem que as emissões em raios-X e microondas são produzidas pela mesma população de elétrons. Os raios-X são produzidos por mecanismo *Bremsstrahlung* de elétrons térmicos ou não-térmicos interagindo com os íons ambientes. Os parâmetros da fonte de raios-X (ópticamente fina), tais como a distribuição da energia dos elétrons, a densidade e medida da emissão, e a temperatura do meio ambiente, podem ser obtidas, em função do tempo, a partir dos perfis temporais e dos espectros dessas explosões. A emissão em microondas é produzida pelo mecanismo *gyrosynchrotron* térmico ou não-térmico, ou seja, devido à interação dos elétrons com o campo magnético local. Os parâmetros da fonte de microondas (ópticamente espessa abaixo da frequência de pico e ópticamente fina acima da frequência de pico) também podem ser investigados a partir dos perfis temporais e dos espectros dessas explosões. Dessa forma, observações em microondas combinadas com observações em raios -X duros, principalmente com alta resolução espacial, espectral e temporal, são necessárias para a investigação dos processos físicos fundamentais associados aos elétrons energéticos emissores.

A observação de explosões impulsivas de microondas exigem instrumentos com alta resolução temporal, espectral e espacial, a fim de possibilitar novos progressos na interpretação dos seus espectros, reconhecidamente gerados pelo mecanismo *gyrosynchrotron*.

Neste trabalho estaremos particularmente interessados na parte ópticamente fina do espectro de microondas, representada pelas observações de explosões solares impulsivas que realizamos na faixa de 18 a 23 GHz.

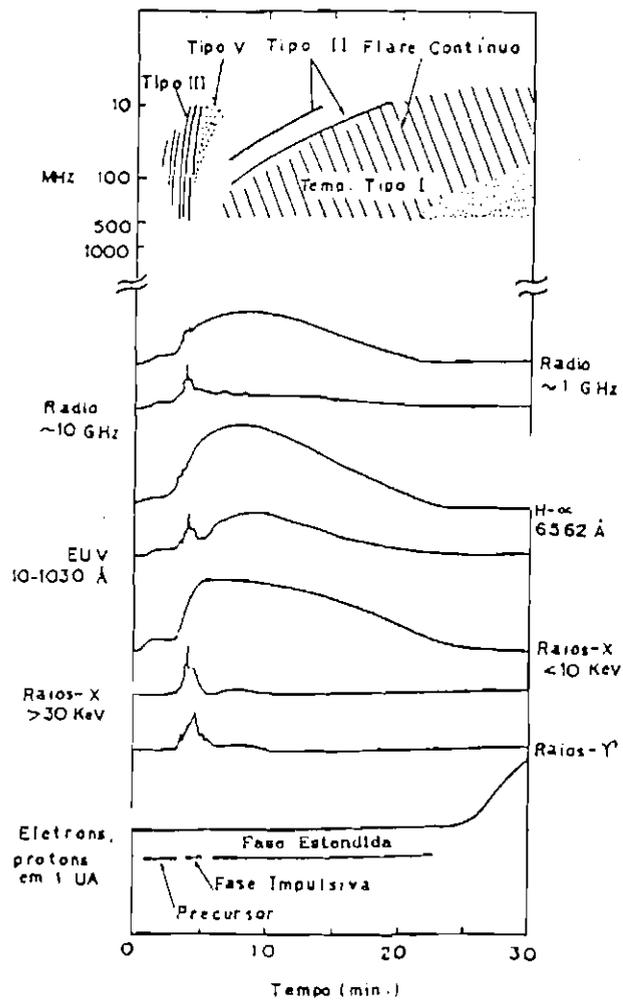


Fig. 1.1 - Representação esquemática das diferentes fases de um *flare* solar, como observado desde as ondas de rádio até a emissão de partículas. FONTE: Kane (1974), p.365.

### 1.1. INVESTIGAÇÕES TEÓRICAS DA EMISSÃO SOLAR EM MICROONDAS

Admite-se, atualmente, que durante uma explosão solar, a radiação para frequências acima de 1 GHz, é, predominantemente, gerada pelo mecanismo de emissão *gyrosynchrotron* devido a elétrons levemente relativísticos interagindo com os campos magnéticos locais.

O mecanismo de emissão em questão, para um alto número de harmônicos emitidos, resulta num espectro de emissão tipicamente contínuo caracterizado pelos índices espectrais ópticamente espesso ( $\beta > 0$ ) e ópticamente fino ( $\beta < 0$ ) e pela frequência de pico ( $f_p$ ) (Figura 1.2).

Os principais mecanismos de atenuação da emissão para frequências abaixo e acima da frequência de pico são, respectivamente: i) a dependência entre o coeficiente de emissão e o índice de refração do meio emissor (*efeito Razin*); ii) as possíveis absorções que a radiação pode sofrer durante a sua propagação, especialmente a auto-absorção *gyrosynchrotron*;

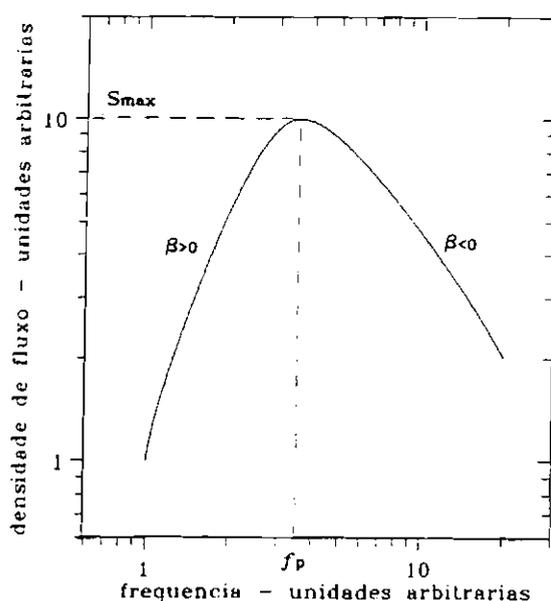


Fig. 1.2 - Espectro teórico para a emissão *gyrosynchrotron*, onde  $\beta$  são os índices espectrais e  $f_p$  a frequência de pico correspondente à máxima densidade de fluxo  $S_{max}$ .

Quando os parâmetros cromosféricos, que influenciam a emissão (campo magnético, densidade e temperatura), são considerados espacialmente constantes, o modelo para a fonte de emissão é dito *homogêneo*. Para o caso não-homogêneo geralmente se considera a variação espacial da densidade e/ou do campo magnético. Dependendo do modelo considerado (homogêneo ou não) o espectro calculado poderá apresentar variações no seu perfil.

Holt e Ramaty (1969), e Ramaty (1969), apresentaram os primeiros cálculos detalhados para o espectro da emissão *gyrosynchrotron*, admitindo os elétrons emissores como levemente relativísticos. Consideraram os efeitos de auto-absorção, assumindo um campo magnético uniforme na fonte de emissão e concluíram, por meio desse modelo, que o efeito do plasma ambiente sobre a emissão só é relevante para frequências acima de 3 GHz, porém, abaixo da frequência de pico.

Takakura e Scalise (1970) estudaram um modelo para a fonte onde o campo magnético varia com a altura acima da fotosfera solar e admitiram uma densidade eletrônica constante de pequeno valor, o que permitiu, numa primeira abordagem, negligenciar os efeitos de auto-absorção. Posteriormente, Takakura (1972) realizou novos cálculos considerando a auto-absorção e assumindo ainda um campo magnético não-uniforme. Desses estudos, concluíram que a não-uniformidade do campo diminui o valor do índice espectral ópticamente espesso, provocando assim um alargamento da curva espectral.

Klein (1984) considerou a combinação do *efeito Razin* e das possíveis absorções que a radiação pode sofrer no seu trajeto de propagação e concluiu que influenciam muito a região de baixas frequências do espectro, evidenciando assim que a radiação *gyrosynchrotron* é produzida com maior eficiência nos meios mais tênues com índice de refração próximos à unidade.

As expressões gerais para os coeficientes de emissão e absorção da radiação *gyrosynchrotron* foram apresentadas por Ginzburg e Syrovatskii (1965) e mais recentemente por Melrose (1980). Entretanto, são expressões complexas que demandam um esforço de cálculo considerável, como pode ser notado nas primeiras simulações numéricas, aplicadas ao caso solar

considerando uma população não- térmica de elétrons, desenvolvidas por Ramaty (1969) e Takakura e Scalise (1970).

Limitando os parâmetros como índice espectral, número de harmônicos e ângulo de observação, das equações gerais de Takakura (1972), Dulk e Marsh (1982) derivaram expressões mais simples para a radiação *gyrosynchrotron* de elétrons levemente relativísticos com uma distribuição não-térmica (lei de potência). Eles mostraram que embora simples, essas expressões são bastante precisas, considerando elétrons com energias entre 10 KeV e 1 MeV (faixa típica dos elétrons dos *flares* solares).

Outra investigação teórica relevante para os estudos da fase impulsiva dos *flares* solares, foi desenvolvida por Holman (1985). Nesse trabalho, ele estudou a aceleração dos elétrons, inicialmente com distribuição térmica, devido à ação de um campo elétrico constante produzido durante o *flare*. Uma de suas conclusões (de interesse para o nosso trabalho) é que as escalas temporais envolvidas na aceleração dos elétrons emissores estão relacionadas com a duração dos eventos impulsivos em microondas e raios-X duros. Mais especificamente, ele mostrou que, para as explosões impulsivas em microondas e raios-X duros, o tempo de subida do perfil temporal da explosão (tempo entre a densidade de fluxo mínima, no início, e a densidade de fluxo máxima) é bem próximo ao tempo de geração dos elétrons "dissidentes", isto é, aqueles que deixaram de pertencer à distribuição térmica.

Nesta dissertação apresentaremos estudos semi-qualitativos utilizando as equações de Dulk e March (1982) para o caso não-térmico, e também as equações desenvolvidas por Holman (1985), que serão apresentadas oportunamente.

## 1.2. PRIMEIRAS OBSERVAÇÕES DE EXPLOSÕES SOLARES EM MICROONDAS PARA ESTUDOS ESPECTRAIS

Explosões solares em microondas têm sido observadas desde a década de 60, quando os espectros eram construídos a partir de medidas de fluxo em frequências discretas, obtidas a partir de diferentes observatórios. Uma característica marcante dessas primeiras observações, é a sua baixa resolução temporal, espacial e espectral. Como exemplo (Takakura, 1972), essa pobre resolução em tempo e frequência pode ser verificada na evolução temporal dos espectros da explosão observada em 07 de Julho de 1966 (Figura 1.2).

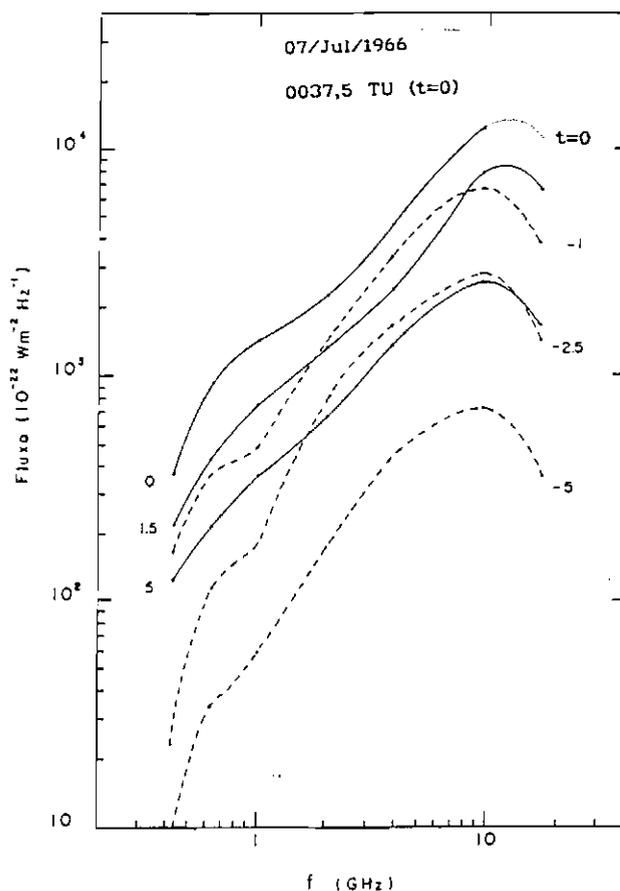


Fig. 1.3 - Variação temporal do espectro para a explosão solar do dia 07/7/1966, onde t é a diferença em minutos em relação ao t = 0 (00 37.5 TU). FONTE: Takakura (1972), p.286.

Guidice e Castelli (1975) investigaram explosões solares em algumas frequências discretas entre 1415 e 35000 MHz, com resolução temporal entre 1 e 6 segundos. Com base nessas explosões eles realizaram um estudo sobre as distribuições espectrais das mesmas. Investigaram a variação temporal do espectro para as explosões de maior intensidade (densidade de fluxo  $S > 550$  UFS, onde 1 UFS = *Unidade de Fluxo Solar* =  $10^{-22} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$ ) e realizaram um estudo estatístico para a frequência de pico de  $\approx 2400$  explosões com densidade de fluxo entre 50 e 500 UFS. Desse estudo, resultou o seguinte sistema de classificação para os espectros das explosões solares em microondas: *Tipo A*, quando a densidade de fluxo aumenta com o aumento da frequência; *Tipo C*, quando a densidade de fluxo apresenta um máximo entre um aumento e um decréscimo com a frequência; *Tipo G*, quando a densidade de fluxo decai com o aumento da frequência (ver Figura 1.3). Também calcularam um espectro do *tipo C*, considerando uma densidade de fluxo de 100 UFS, um campo magnético de 300 gauss e uma fonte com diâmetro angular de 0,1 minuto de arco. Obtiveram uma frequência de pico ( $f_p$ ) com valor próximo a 5 GHz, bem de acordo com o valor médio observado. Posteriormente, Schoéchlin e Magun (1979), baseados no trabalho de Guidice e Castelli, concluíram que o valor do índice espectral ( $\beta$ ), para frequências menores que  $f_p$ , varia entre 0 e 4, apresentando um valor médio de 1,8; e para frequências maiores que  $f_p$ , varia entre -1,0 e -3,0, com um valor médio igual a -2.

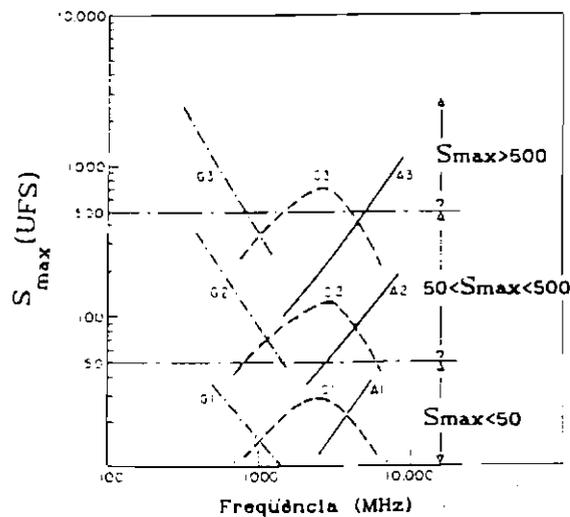


Fig. 1.3 - Principais tipos de espectros para explosões solares em microondas. FONTE: Guidice e Castelli (1975), p. 313.

Um quadro resumido das principais características das explosões solares em microondas, observadas até o início da década de 80, está apresentado na Tabela 1.1; onde podemos notar a limitação da frequência de observação ( $f < 10$  GHz) e também a ausência de explosões solares em microondas com duração da ordem de segundos (escala temporal típica das explosões impulsivas).

**TABELA 1.1 - RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DOS PRINCIPAIS TIPOS DE EXPLOSÕES SOLARES EM MICROONDAS, OBSERVADAS DESDE O INÍCIO DA DÉCADA DE 80. FONTE: DULK (1985), p. 222.**

Tipo da Explosão	Duração	$T_b(K)$	Polarização (circular)	Intervalo de frequência largura de banda	Intervalo de altura topologia magnética	Associação	Mecanismo de emissão
impulsivo	>1 min (em 10 GHz)	$10^7-10^9$	~30% x-mode	3-30 GHz/ 10 GHz	~ $10^4$ km fechada	pequenos a grandes flares, raios-X duros	gyrosynchrotron Maxwelliano ou lei de potência
tipo IV	~10 min	$10^7-10^9$	~30% x-mode	1-30 GHz/ 10 GHz	$10^4-10^5$ km fechada	grandes flares com shocks	gyrosynchrotron lei de potência
'postburst'	minutos a horas	~ $10^7$	baixa	1-10 GHz/ 5 GHz	$10^4-10^5$ km fechada	flare fase atrasada	bremsstrahlung térmico
'spike'	~10 min (grupo)	> $10^{13}$	~100% x-mode?	~0.5-5 GHz poucos MHz	$10^4-10^5$ km fechada	flare raios-X duros	cyclotron maser

### 1.3. ESTUDO DE EXPLOSÕES SOLARES OBSERVADAS COM ALTA RESOLUÇÃO E ALTA SENSIBILIDADE

Em 1981 entrou em operação o interferômetro do Owens Valley Radio Observatory (OVR0), operando com medidas de polarização circular, R e L, em 45 frequências na faixa de 1 a 18 GHz ( Hurford et al., 1985); com resolução em frequência de 120 MHz ( $\Delta B_{FI}$ ), resolução temporal de 10 segundos para as duas polarizações, e uma resolução espacial de 46 minutos de arco em 1 GHz e de 2,6 minutos de arco em 18 GHz. Este instrumento deu início à era das observações solares em microondas com alta resolução espectral, porém apresentando ainda uma baixa resolução temporal.

Utilizando este interferômetro, Hurford (1987) investigou, pela primeira vez, a evolução temporal do espectro de explosões em microondas com alta resolução espectral (Figura 1.5). Posteriormente, Stahli et al. (1988) investigaram sistematicamente 49 explosões observadas entre maio e outubro de 1981, na faixa de 1 a 18 GHz, com resolução em frequência superior a 1 GHz e resolução temporal de 10 segundos. A partir dessas observações eles identificaram quatro tipos de perfis espectrais (Figura 1.6): (a) *tipo simples*, (b) *tipo com banda estreita*, (c) *tipo com banda larga* e (d) *tipo complexo* (que evidencia variações dos valores clássicos para índice espectral devido à presença de estruturas finas no espectro). O tipo *complexo* em particular, mostrou que as interpretações em termos de uma única fonte emissora devem ser usadas com cautela quando se observa com baixa resolução espacial ( $> 1''$  de arco). Uma possibilidade é considerar a emissão da radiação a partir de várias fontes individuais com diferentes parâmetros.

No mesmo trabalho, Stahli et al, também investigaram a evolução temporal dos espectros na faixa de 1 a 18 GHz (Figura 1.7) e verificaram que a frequência de pico ( $f_p$ ) não varia durante a observação da explosão. Isto se confronta com a teoria para uma fonte homogênea, que sugere uma grande variação da  $f_p$  durante a duração do evento.

Posteriormente, Pick et al. (1990), com base na evolução temporal apresentada por Stahli et al. (1988), observou que se considerarmos que os espectros evoluem a partir de um *tipo de banda estreita* para um *tipo com banda larga*, a emissão não poderá ser explicada como originária de uma distribuição térmica de elétrons com uma densidade moderada ( $<10^{10}\text{cm}^{-3}$ ). Além disso, de acordo com Dulk (1985) a emissão térmica ópticamente fina prevê um índice espectral elevado ( $\approx 8$ ), o que não foi observado nos trabalhos de Stahli et al. (1989, 1990).

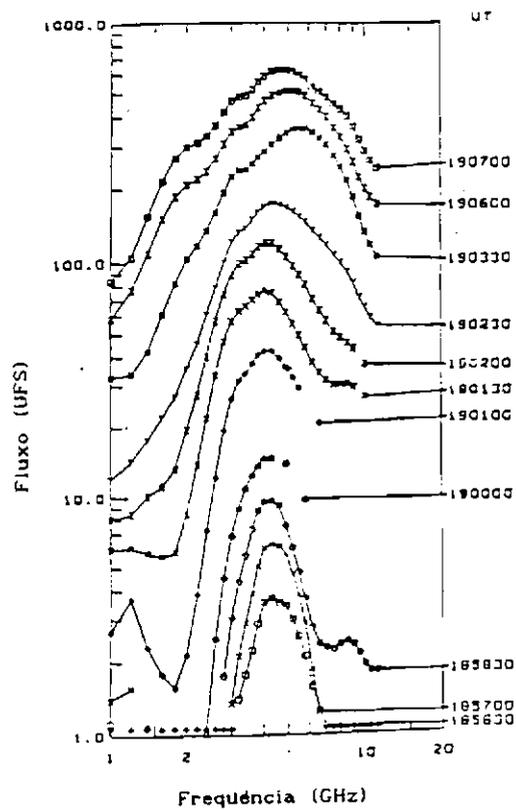


Fig. 1.5 - Evolução temporal do espectro de uma explosão solar observada com alta resolução espectral pelo grupo do OVRO. FONTE: Hurford (1982), p. 323.

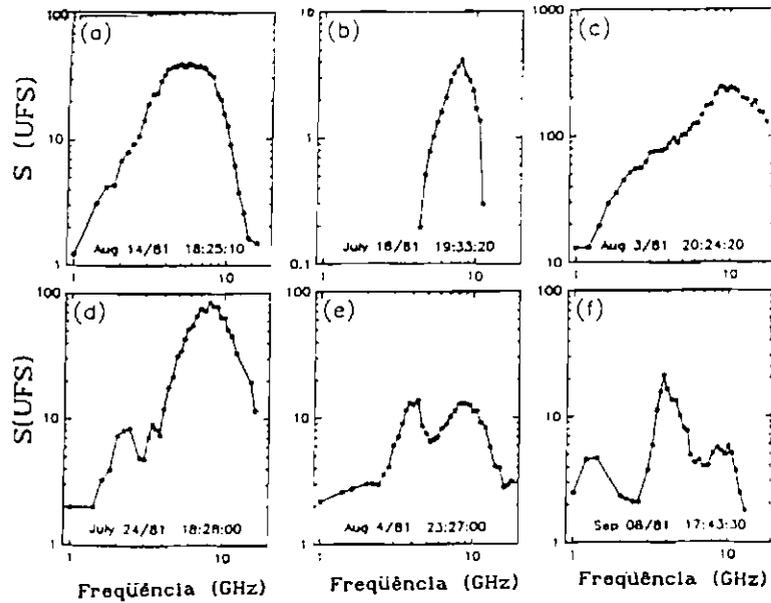


Fig. 1.6 - Tipos de espectros de explosões solares observadas com alta resolução pelo grupo do OVRO. (a) *tipo simples*, (b) *tipo banda estreita*, (c) *tipo banda larga* e (d), (e) e (f) do *tipo complexo*. FONTE: Stahli et al. (1989), p. 128.

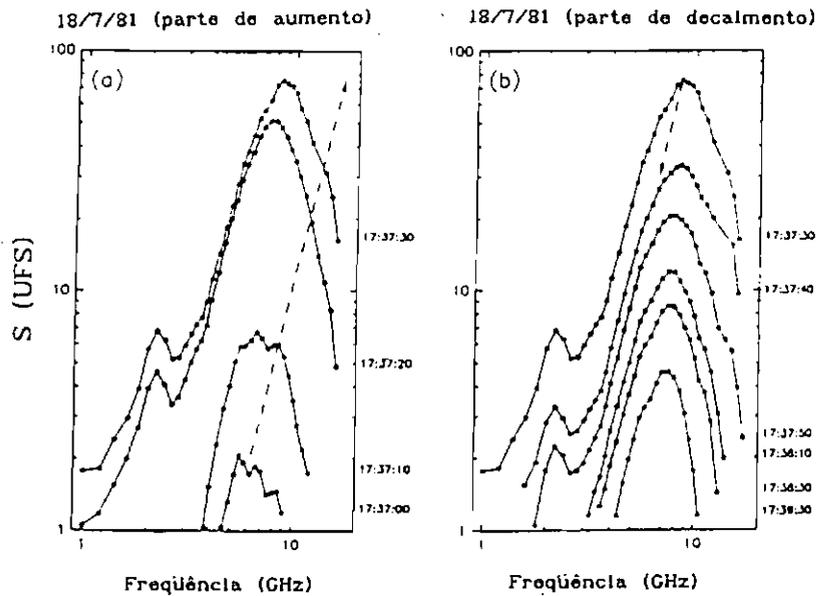


Fig. 1.7 - Evolução temporal do espectro para a explosão solar observada em 18/7/1981 com alta resolução espectral pelo grupo do OVRO. FONTE: Stahli et al. (1989), p. 130.

Como já mencionamos anteriormente, as similaridades entre os perfis temporais das explosões impulsivas em microondas e raios-X duros, sugere que ambas emissões sejam resultantes de uma mesma população de elétrons. Por isso, as observações em frequências de microondas devem ser complementadas por observações em raios-X duros, e vice-versa.

Desde 1980 as explosões solares em raios-X duros têm sido observadas com alta sensibilidade, alta resolução temporal (128 ms) e resolução espacial da ordem de minutos de arco através do "*Hard X-Ray Burst Spectrometer*" (HXRBS) a bordo do "*Solar Maximum Mission Satellite*" (SMMS). Uma vez disponíveis observações conjuntas em raios-X e microondas com alta resolução, as propriedades da distribuição dos elétrons emissores e alguns parâmetros característicos da fonte podem ser melhor examinados, como discutido nos trabalhos de Holt e Ramaty (1969); Dulk e Dennis (1982); Kosugi, Dennis e Kai (1988); Crannell et al.(1988) e, mais recentemente, no artigo de revisão de Pick et al.(1990).

#### 1.4 - O PROBLEMA

Como vimos, na radioastronomia solar há uma falta de observações espectrais, de alta sensibilidade com alta resolução temporal e espectral, acima de 18 GHz e por isso são raras as investigações sobre o espectro acima dessa frequência. Por isso, os cálculos para explosões em microondas são geralmente realizados para uma única frequência, o que impossibilita a consideração dos aspectos dinâmicos do fenômeno observado, geralmente investigado através da evolução temporal do espectro.

Essa limitação instrumental motivou o desenvolvimento, no Brasil, de um radiômetro de frequência variável (18-23 GHz) com alta resolução espectral e temporal em operação desde 1989 (detalhes sobre este instrumento serão apresentados no Capítulo 2), que nos permitiu observar, pela primeira vez, um conjunto de  $\approx 64$  explosões solares na faixa de 18 a 23 GHz. Dessa forma, o objetivo central deste trabalho é apresentar os primeiros estudos realizados com as explosões solares observadas com esse radiômetro, que constitui uma investigação espectral inédita de explosões solares impulsivas na faixa milimétrica (Rosa et al., 1990; Sawant et al. 1991).

Nesta dissertação, iremos desenvolver alguns estudos quantitativos e outros semiquantitativos, que poderão contribuir na investigação dos modelos propostos para a fonte da emissão de microondas e raios-X duros, associados à fase impulsiva do *flare*.

Dispondo dos perfis temporais e dos espectros das explosões observadas na faixa de 18 a 23 GHz, além de alguns eventos correlacionados em Tempo de Pico nas frequências de  $H\alpha$ , microondas e raios-X duros, as seguintes questões serão discutidas:

- 1) Qual a porcentagem de explosões impulsivas observadas na faixa de 18 a 23 GHz? E quantas são explosões do tipo simples, possivelmente associadas aos *Elementary Flare Bursts* ?
- 2) Qual a faixa típica para os valores da *densidade de fluxo* dessas explosões impulsivas?
- 3) Quais os valores característicos para os parâmetros do espectro de emissão *gyrosynchrotron*, quando incluímos a faixa de 18 a 23 GHz?
- 4) Que tipo de processo de aceleração (impulsivo ou contínuo) e mecanismo de emissão (térmico ou não-térmico) são sugeridos pela evolução temporal dos espectros na faixa de 18 a 23 GHz, uma vez que existem muito poucas conclusões, a partir desse tipo de análise, para a parte ópticamente fina do espectro?
- 5) Quais os valores característicos para os parâmetros da fonte responsável pela emissão impulsiva do tipo simples na faixa de 18 a 23 GHz?



## CAPÍTULO 2

## INSTRUMENTAÇÃO E OBSERVAÇÕES

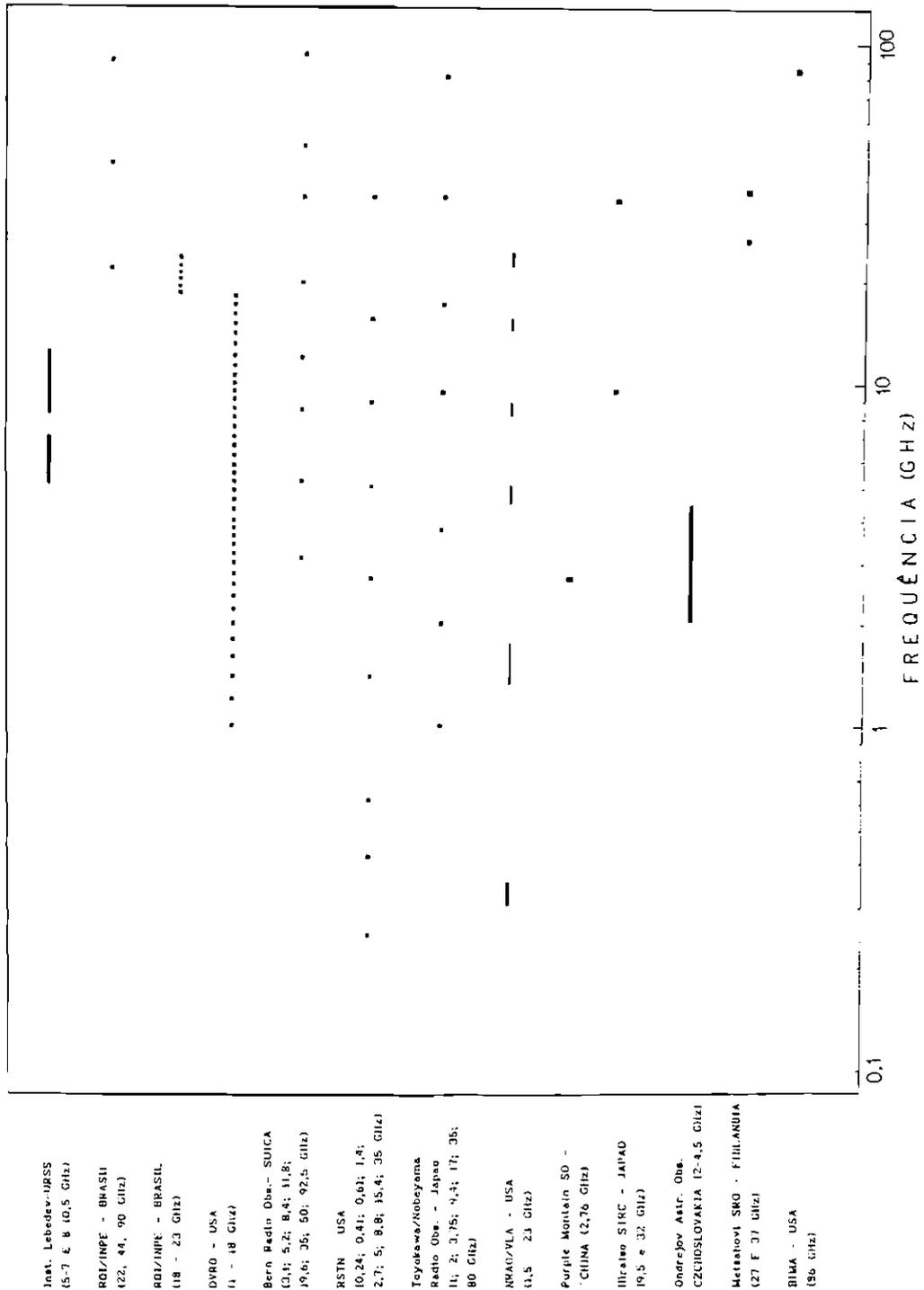
## 2.1 - INTRODUÇÃO

As primeiras observações espectrográficas solares em ondas de rádio surgiram no fim da década de 40 por intermédio de Wild e Mc Cready (1950), que observaram na faixa métrica de 40 a 70 MHz. Observações espectroscópicas solares nas faixas de comprimento de onda centimétrico e milimétrico iniciaram-se efetivamente a partir do início da década de 80 (Kaverin et al., 1979, Kaverin et al., 1980). A partir de 1985 foi desenvolvido um interferômetro de alta resolução em microondas pelo grupo do Owens Valley Radio Observatory, operando com medidas de polarização circular à esquerda (L) e à direita (R) em 45 frequências na faixa de 1 a 18 GHz (Hurford et al., 1984). Apresentava resolução em frequência de 120 MHz, resolução temporal de 10 segundos e resolução espacial de 46' de arco em 1 GHz e 2,6' de arco em 18 GHz.

Os instrumentos mais importantes para observações solares em microondas, existentes atualmente no mundo, estão dispostos na Tabela 2.1, onde nota-se a falta de radiômetros de frequência variável operando com alta sensibilidade acima de 18 GHz.

A partir de 1988 a equipe técnica do Rádio Observatório do Itapetinga, por sugestão do Grupo de Radioastronomia e Física Solar do INPE, implementou modificações no receptor de 22 GHz, que operava juntamente com a antena de 13,7 metros de diâmetro (Kaufmann et al., 1976, Kaufmann et al., 1982). Obteve-se, por meio dessas modificações, um receptor de frequência variável de alta sensibilidade operando nas frequências de 18, 19, 20, 21, 22 e 23 GHz, com resolução em frequência de 1 GHz. Até meados de 1989 o sistema dispunha de resolução temporal de 8 e 16 segundos, apropriada para a observação de *regiões ativas* (Cecatto, 1991). Com o início do atual período de máxima atividade solar (ver Figura 2.1) o sistema foi alterado em resolução temporal a fim de propiciar as observações de *explosões solares* com resolução de 1,2 s inicialmente e, posteriormente, melhorada para 0,6 s. Atualmente, estamos planejando obter uma resolução temporal de 0,3 s.

TABELA 2.1 - INSTRUMENTAÇÃO ATUAL, NO MUNDO, PARA OBSERVAÇÕES SOLARES EM MICROONDAS



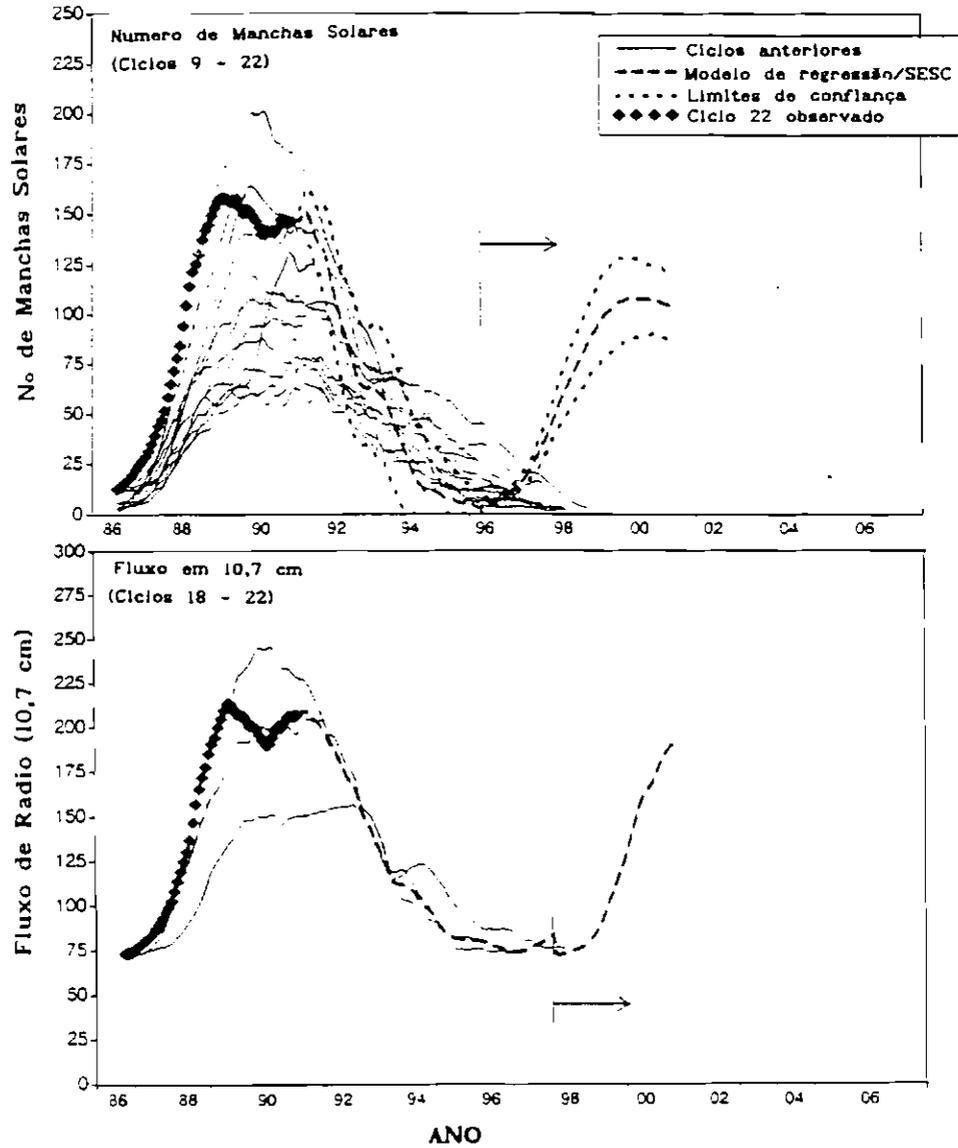


Fig. 2.1 - Ciclo solar número 22 comparado com ciclos anteriores. FONTE: Solar Max Mission Bulletin no 7 (1991), p. 3.

## 2.2 - RADIÔMETRO DE FREQUÊNCIA VARIÁVEL

O sistema é composto de um refletor primário parabólico, com diâmetro de 13,7 metros, e um refletor secundário hiperbólico localizado no foco do parabolóide. No foco do hiperbolóide encontra-se uma corneta retangular operando com polarização linear horizontal na banda de 18 a 23 GHz. A partir da corneta temos o *receptor de frequência variável* e o sistema de aquisição de dados, que constituem o Radiômetro Milimétrico Variável (18 - 23 GHz), disponível no ROI para observações solares nessa faixa de frequências (ver Figura 2.2).

O sinal que entra pela corneta percorre um guia de onda e entra no misturador, que recebe também um sinal de frequência variável derivado de um oscilador local *YIG*. Esse oscilador varia sua frequência descontinuamente de acordo com uma voltagem variável (- 200 mV por degrau) aplicada ao mesmo. O tempo de variação dessa voltagem é da ordem de nanosegundos com um tempo de permanência, em cada nível de frequência, igual a 0,1 ou 0,2 segundos. O sinal de FI (500MHz), na saída do misturador, é enviado simultaneamente para dois receptores. A razão dos ganhos para os dois receptores é de 10:1. Um dos receptores registra os eventos com pequenos níveis de fluxo sem atenuação (faixa dinâmica de 20 dB), enquanto o outro receptor registra eventos com níveis de fluxo relativamente mais altos sem atenuação (faixa dinâmica de 39 dB). Além disso, o sinal na saída do receptor de menor ganho é enviado para um sistema que controla automaticamente o nível do sinal, para o qual um evento com nível de  $10^4$  UFS (*Unidade de Fluxo Solar* =  $10^{-22} \text{ Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1}$ ) é linearmente atenuado por uma chave com posições "in/off".

Considerando essa instrumentação, dispomos atualmente de um radiômetro de frequência variável (18 - 23 GHz) com resolução em frequência igual a 1 GHz e com resolução temporal opcional de 1,2 ou 0,6 segundos.

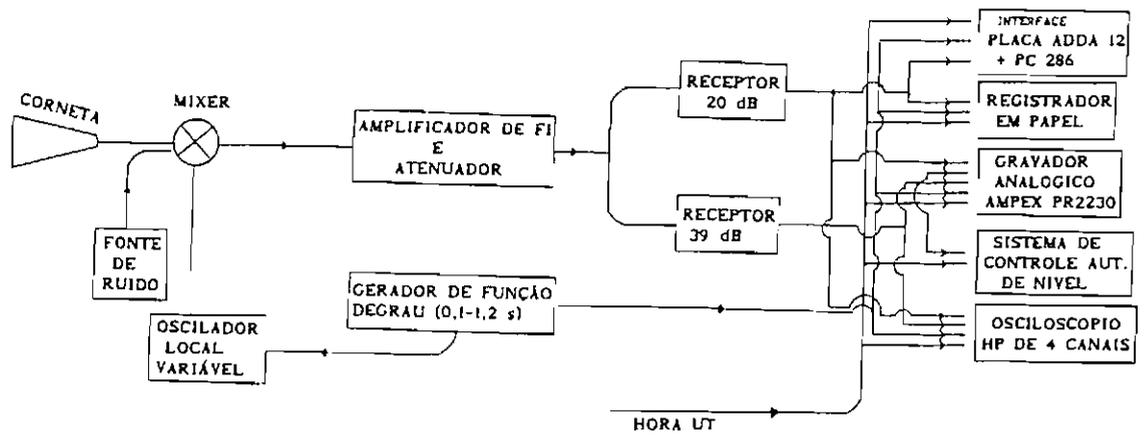


Fig. 2.2 - Diagrama de blocos da instrumentação atual disponível no ROI, para observações solares, utilizando o radiômetro de frequência variável operando na faixa de 18 a 23 GHz.

### 2.3 - SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Como vimos, o espectrômetro milimétrico executa chaveamento sucessivo nas frequências 18, 19, 20, 21, 22 e 23 GHz, permanecendo 100 ou 200 ms em cada canal.

As saídas dos receptores, a saída do controle automático de nível e a saída do gerador de código temporal ("Universal Time") são gravadas separadamente, de modo analógico, em quatro canais independentes de um gravador Ampex PR2230, sendo que as saídas dos receptores em formato serial, são gravadas sobre cada canal para cada varredura executada. Além disso, o código de marca de frequência é gravado sobre um quinto canal para uma posterior análise dos dados.

Para propósito de monitoramento, a varredura é integrada sobre a frequência e gravada com constante de tempo de 1 segundo num registrador de papel HP 7100-BM. Os sinais também são monitorados através de um osciloscópio Tektronix de quatro canais, ligados nas saídas do gravador Ampex, e se apresentam conforme os sinais mostrados na Figura 2.3.

Posteriormente, e/ou em tempo real, o sinal serial é digitalizado. Para isso dispomos de um sistema de digitalização (placa digitalizadora mais a interface necessária) desenvolvido no INPE, juntamente com um microcomputador PC 286 (Martinazzo et al., 1991; Martinazzo et al., 1992).

No *software* desenvolvido (ver apêndice B) para digitalizar e plotar os perfis temporais dos eventos numa escala conveniente (considerando a calibração do sistema) foi levado em conta o tempo de estabilização do oscilador YIG em relação à saída do receptor, que é dez vezes menor que o tempo de permanência em cada frequência (100 ou 200 ms). Por isso, a digitalização do sinal gravado, para cada frequência, é feita somente sobre o intervalo de tempo onde o sinal já se apresenta estabilizado (veja a Figura 2.4). A escala de densidade de fluxo é plotada em UFS e a escala de tempo em *Tempo Universal* - UT; veja na Figura 2.5, como exemplo, o perfil temporal digitalizado, para uma explosão na faixa de 18 a 23 GHz, juntamente com o perfil temporal para o mesmo evento observado em raios-X duros, mostrando assim, o bom desempenho do sistema.

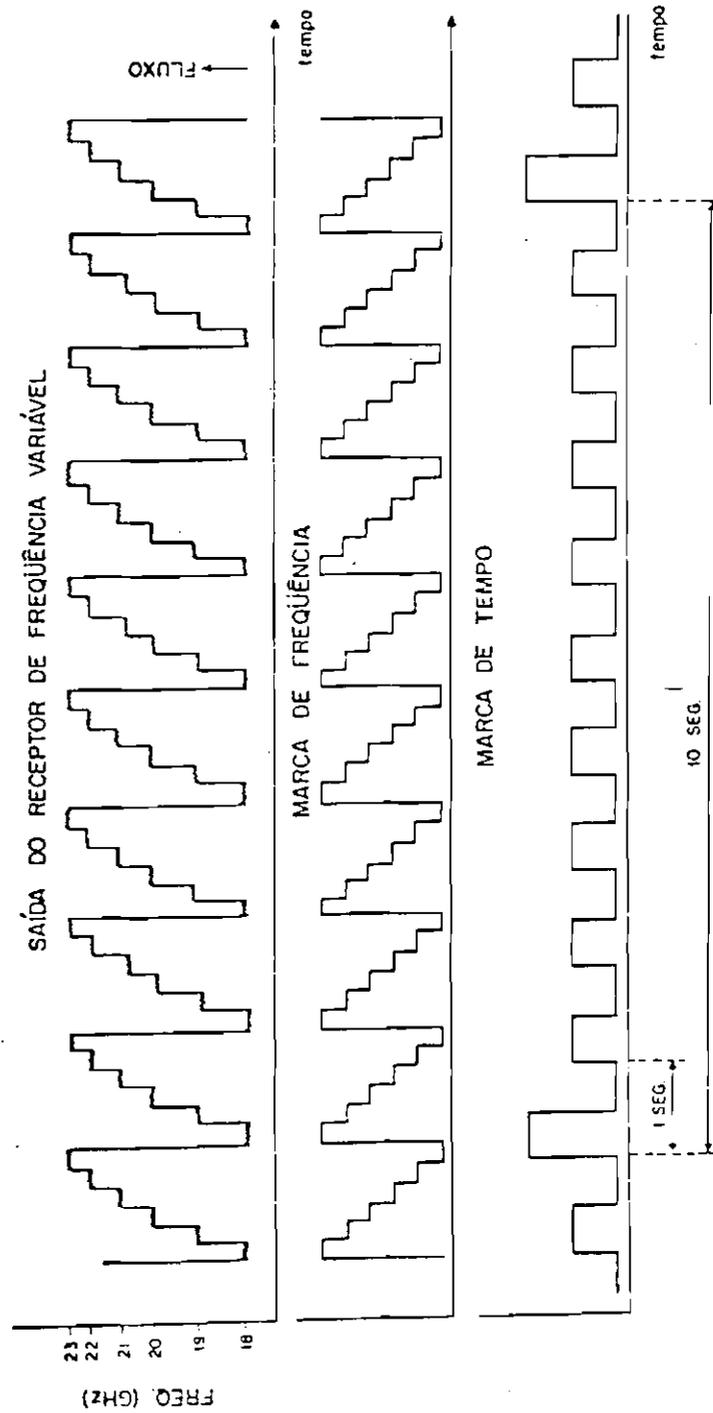


Fig. 2.3 - Formato dos dados obtidos com o radiômetro de frequência variável (18-23 GHz), como monitorados pelo osciloscópio.

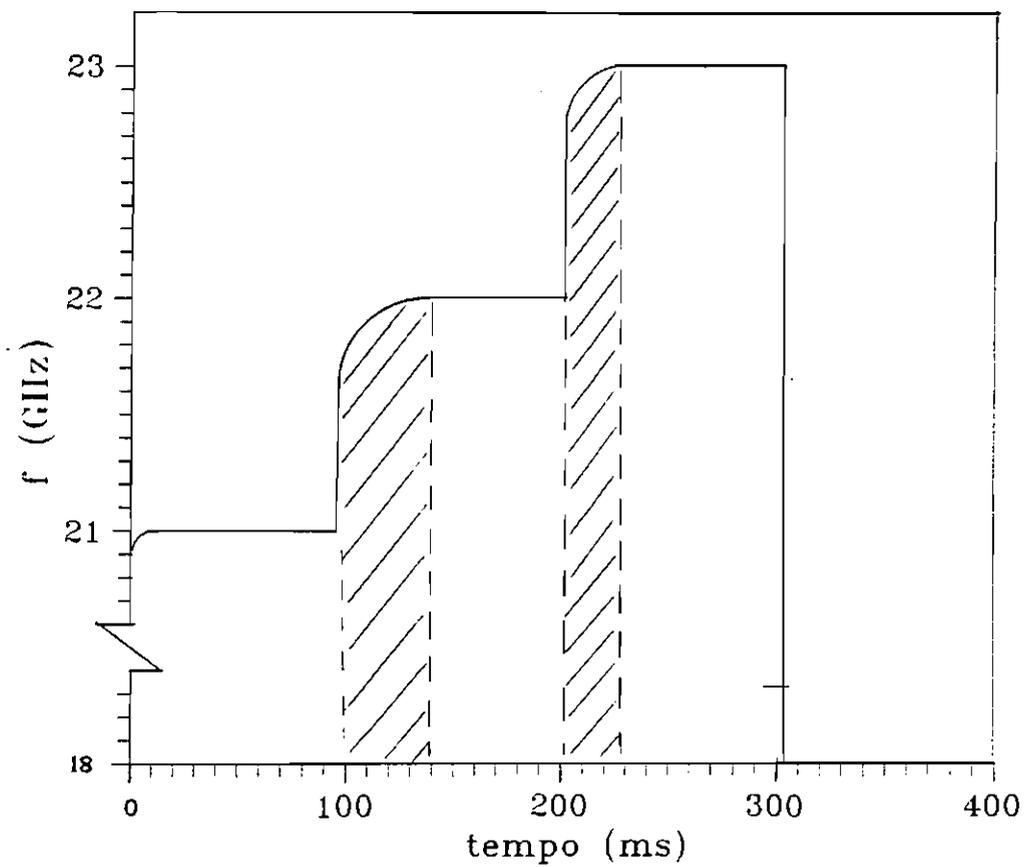


Fig. 2.4 - Sinal mostrando o efeito "hatch" correspondente ao tempo de estabilização do oscilador YIG.

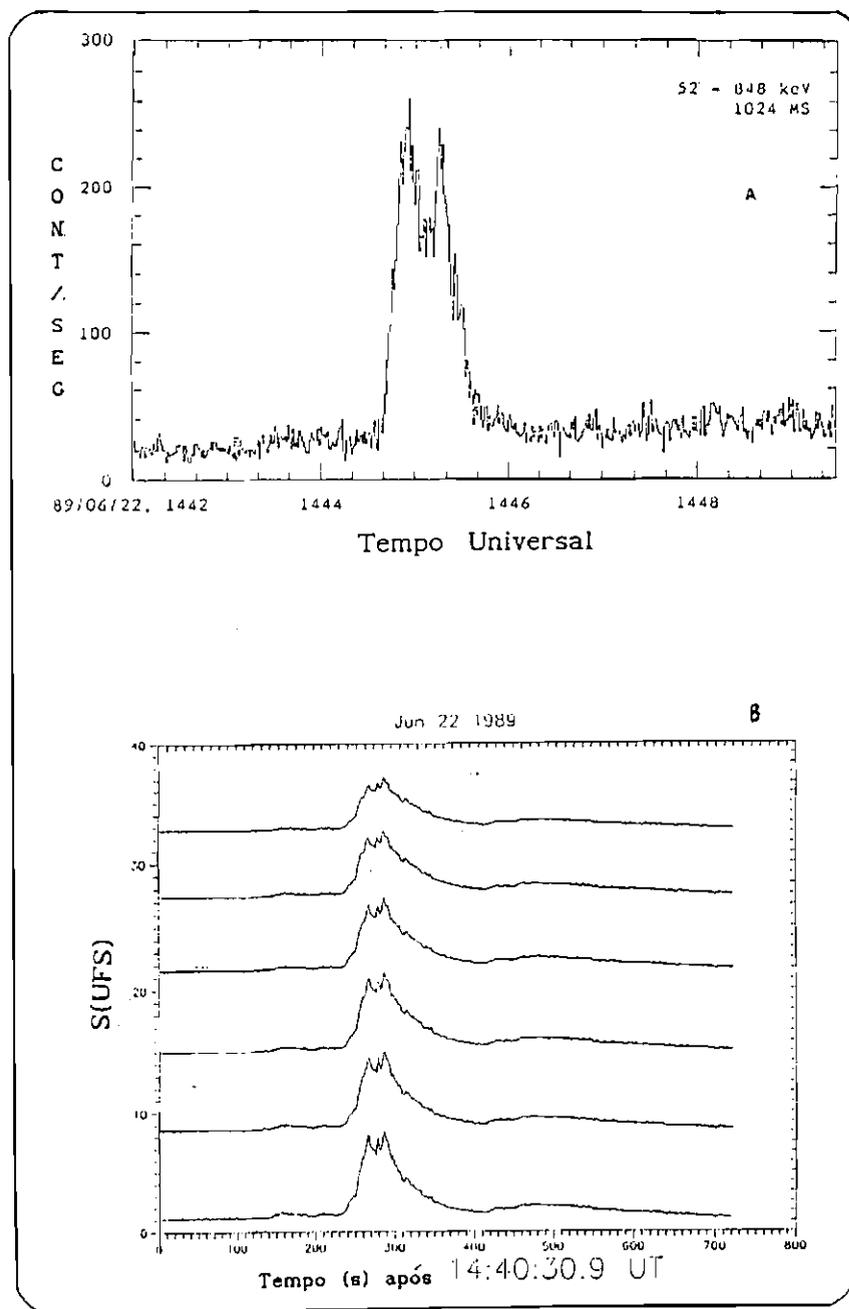


Fig. 2.5 - Perfil temporal digitalizado (18-23 GHz) (a) associado com o perfil temporal digitalizado em raios X duros para o mesmo evento observado pelo HXRBS/SMM.

## 2.4 - PARÂMETROS DO RADIÔMETRO E CALIBRAÇÃO DO SISTEMA

A mínima densidade de fluxo detectada ( $\Delta S_{\min}$ ) é proporcional a mínima temperatura de antena detectada ( $T_0$ ) que, por sua vez, é proporcional a temperatura do sistema. A mínima densidade de fluxo detectada é dada pela seguinte expressão (Kraus, 1966):

$$\Delta S = 2k \Delta T / A_e (\Delta f \tau)^{1/2} \quad (2.1)$$

onde, para o caso solar, teremos

$$\Delta T_{\min} = T_s + T_b + T_{cs} + T_{ra} \quad (2.2)$$

que expressa a mínima temperatura detectável. Finalmente, podemos escrever a expressão mais geral para a mínima densidade de fluxo detectada como:

$$\Delta S_{\min} > 2k(T_s + T_b + T_{cs} + T_{ra}) / A_e (\Delta f \tau)^{1/2} \quad (2.3)$$

onde  $k$  é a constante de Boltzmann;  $T_s$  é a temperatura do sistema;  $T_b$  é a temperatura de "background";  $T_{cs}$  é temperatura do centro do disco solar (equivalente a temperatura do sol calmo);  $T_{ra}$  é a temperatura da região ativa expressa em porcentagens da temperatura  $T_{cs}$ ;  $\Delta f$  é a largura de banda do receptor;  $\tau$  é a constante de tempo de integração do sistema; e  $A_e$  é a abertura efetiva da antena. De acordo com a fórmula 6-15 do livro *Radio Astronomy* (Kraus, 1966) temos que  $A_e(\lambda) = \lambda^2 / \Omega_A$ , onde  $\lambda$  é o comprimento de onda do sinal detectado e  $\Omega_A$  é o ângulo sólido do feixe em  $\text{rad}^2$ . Considerando que  $\Omega_A \approx \pi \theta_{el} \theta_{az}$  e que  $\lambda^2 = c^2 / f^2$ , podemos escrever a expressão para a *Abertura Efetiva* em função da frequência, tendo  $\text{cm}^2$  como unidade, tal que

$$A_e(f) = (c^2 / f^2 \cdot \pi \cdot \theta_{el} \cdot \theta_{az}) \cdot (3600''^2 / 3,046 \cdot 10^{-4} \text{ rad}^2) \quad (2.4)$$

onde  $f$  é a frequência de observação; os  $\theta$  são a largura do feixe em elevação, e azimute, para a frequência  $f$ .

Para o cálculo dos parâmetros mencionados acima, se faz necessário proceder as seguintes calibrações no sistema: a) da temperatura de antena, juntamente com a largura do seu feixe como função da frequência; b) dos receptores, obtendo o valor da temperatura absoluta dos receptores e a dependência dos mesmos com a frequência.

Para a calibração da temperatura da antena utilizamos um absorvedor de referência (espuma de poliuretano impregnada com fuligem, que apresenta um valor típico da temperatura ambiente:  $\approx 295$  K). Este absorvedor de referência, também chamado de "LOAD", é colocado em frente da corneta bloqueando a sua abertura, e posteriormente procede-se a sua retirada e efetua-se a medida da temperatura do céu. O sinal de calibração resultante corresponde à seguinte diferença:

$$\Delta T_{cal} = T_{load} - T_{back} \quad (2.6)$$

Este método elimina o efeito de atenuação atmosférica de primeira ordem (Ulich e Haas, 1976). Os detalhes desta calibração, para o radiômetro de 22 GHz do ROI, estão descrito com detalhes em Kaufmann et al.(1982).

Considerando o sinal de calibração para a fonte como a diferença

$$\Delta T_{fonte} = T_{cs} - T_{back} \quad (2.7)$$

definimos a temperatura de antena corrigida da fonte ( $T_0$ ) como:

$$T_0 = (\Delta T_{fonte} / \Delta T_{cal}) \cdot T_{load} \quad (2.8)$$

ou seja,

$$T_0 = [(T_{cs} - T_{back}) / (T_{load} - T_{back})] \cdot T_{load} \quad (2.9)$$

A determinação da largura do feixe da antena é feita por meio de varreduras sucessivas, tanto em azimute quanto em elevação, sobre uma fonte com diâmetro angular conhecido, em relação à largura de feixe estimada para a antena ( $\approx 4'$  de arco). A tabela 2.2 fornece essas medidas utilizando como fontes calibradoras Júpiter e Virgo A.

A partir de uma média das medidas da Tabela 2.2, em cada uma das frequências, obtivemos as curvas da largura do feixe da antena em função da frequência em elevação e em azimute (Figuras 2.6. a e b).

TABELA 2.2 - LARGURA DO FEIXE DA ANTENA

DATA	FONTE	f (GHz)	HPBW <sub>EL</sub> (')	HPBW <sub>AZ</sub> (')
29/06/89	VIRGO A	18	—	5,4
18/12/89	JÚPITER	18	—	5,3
10/05/90	JÚPITER	18	4,6	—
29/06/89	VIRGO A	19	4,5	5,2
18/12/89	JÚPITER	19	4,6	—
20/06/89	JÚPITER	20	—	5,0
22/06/89	JÚPITER	20	4,2	—
18/12/89	JÚPITER	20	4,6	—
21/06/89	JÚPITER	21	—	4,8
19/12/89	JÚPITER	21	4,0	—
22/12/89	JÚPITER	21	4,4	—
22/12/89	JÚPITER	21	4,0	—
23/12/89	JÚPITER	21	4,0	—
13/05/90	JÚPITER	21	4,3	—
14/06/89	JÚPITER	22	—	4,7
29/06/89	VIRGO A	22	4,0	—
18/12/89	JÚPITER	22	4,1	4,7
03/04/91	JÚPITER	22	4,8	—
03/04/91	JÚPITER	22	—	4,6
27/06/90	VIRGO A	23	3,8	—
14/05/90	JÚPITER	23	—	4,9

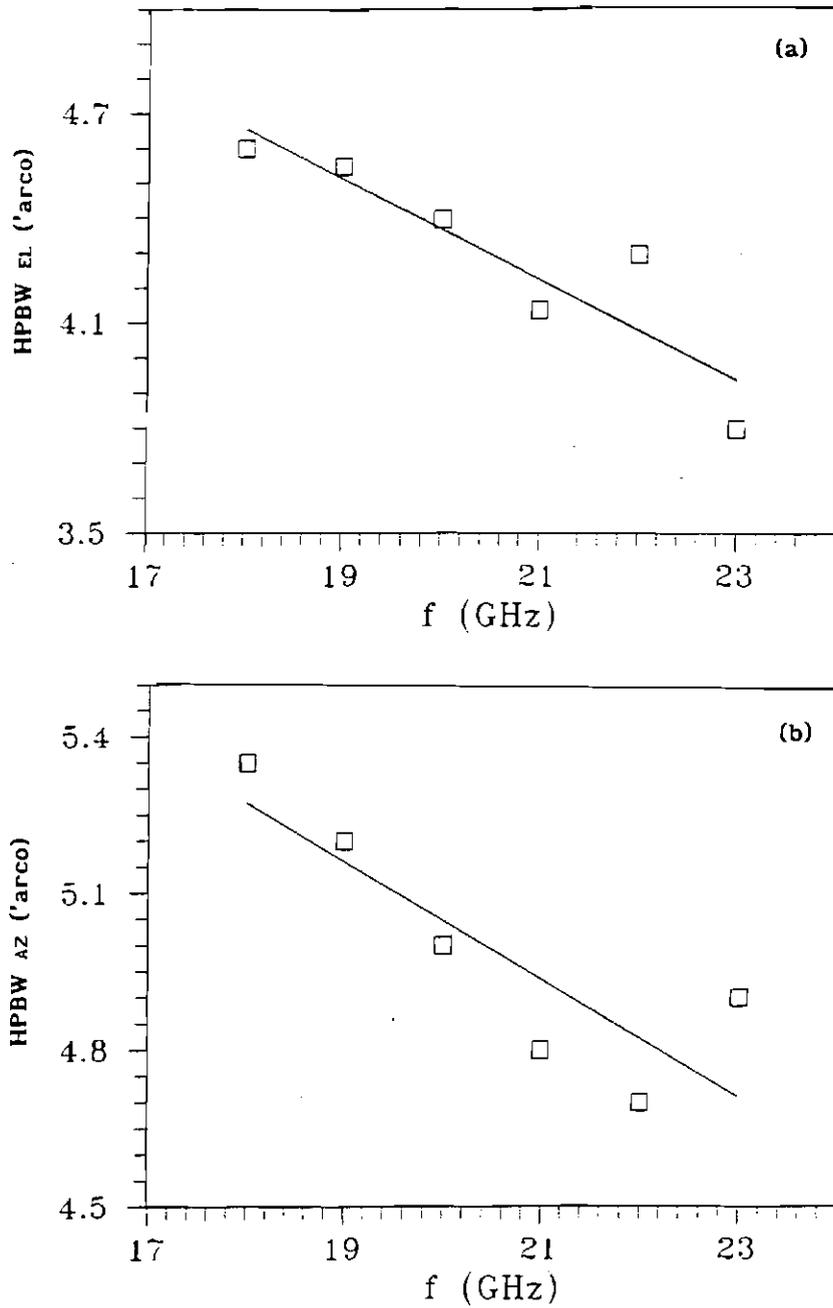


Fig. 2.6 - Largura de meia potência do feixe da antena (ROI) em função da frequência, medido em Elevação (a) e Azimute (b).

Utilizando a fórmula 2.4, para a área efetiva, calculamos a sua dependência com a frequência (veja a Tabela 2.3).

**TABELA 2.3 - ÁREA EFETIVA DA ANTENA**

f(GHz)	18	19	20	21	22	23
$A_e (m^2)$	41,9	40,4	39,3	38,1	37,2	37,0

A temperatura absoluta do receptor é obtida usando o absorvedor de referência com temperatura  $\approx 300$  K e nitrogênio líquido com temperatura de  $\approx 77$  K. Assim, os valores obtidos para a faixa de 18 a 23 GHz estão entre 1724 e 1082 K, respectivamente (veja a Tabela 2.4).

A calibração do receptor dependente da frequência é feita por meio de uma fonte de ruído "NOISE COM NC - 5142", em conjunto com os atenuadores disponíveis, com a temperatura de ruído excedendo  $10^4$  K. A dependência dos valores da temperatura da fonte de ruído com a frequência está disposta na Tabela 2.5.

**TABELA 2.4 - TEMPERATURA ABSOLUTA DO RECEPTOR**

f(GHz)	18	19	20	21	22	23
T (K)	1724	1654	1283	1148	989	1082

**TABELA 2.5 - TEMPERATURA DA FONTE DE RUIDO (NOISE - COM)**

f (GHz)	18	19	20	21	22	23
T (K)	69,0	90,3	109,7	122,6	137,0	140,4

## 2.5 - CALIBRAÇÃO DO SINAL DURANTE A OBSERVAÇÃO

Durante cada dia de observação realizamos, pelo menos duas vezes, a calibração do nível do sinal para posterior conversão em unidades de fluxo solar, já digitalizadas.

Desviando a antena do Sol em cerca de 4° medimos, por alguns segundos, o nível do sinal para o céu. Acrescenta-se então o sinal do absorvedor de referência (LOAD) e, após alguns segundos, o sinal da fonte de ruído (NOISE SOURCE). Posteriormente, retira-se primeiramente o sinal do LOAD e em seguida o sinal do NOISE SOURCE, retomando o apontamento e o sinal da região ativa rastreada.

Obtemos assim um perfil temporal digitalizado de calibração para cada frequência (ver um exemplo na Figura 2.7). Por meio destes perfis temporais encontramos as amplitudes de temperatura equivalentes às amplitudes em unidades relativas de fluxo, que, por meio da expressão 2.1, são convertidas para valores de amplitudes em Unidade de Fluxo Solar.

## 2.6 - SENSIBILIDADE COMO FUNÇÃO DA ATIVIDADE DA FONTE

A região ativa apresenta uma porcentagem de "atividade" relacionada com os valores de temperatura detectados, estimada através da expressão

$$P(\%) = 100 \cdot (T_{ra} - T_{cs}) / (T_{cs} - T_b) \quad (2.10)$$

Para o caso de observações de explosões solares o receptor trabalha com uma largura de banda de FI de 500 MHz e com  $\tau$  de 100 ou 200 ms. Com os valores medidos para as temperaturas, na frequência de 22 GHz, calculamos os valores para a sensibilidade e para a porcentagem da região ativa, levando em consideração a contribuição da temperatura equivalente do ruído, que apresentou um valor médio de  $\approx 53$  K. A curva de sensibilidade em função da porcentagem da região ativa mostra que os valores de  $\Delta S_{min}$  apresentam uma variação positiva com a porcentagem da região ativa, representada pelas seguintes funções (ver Figura 2.8):

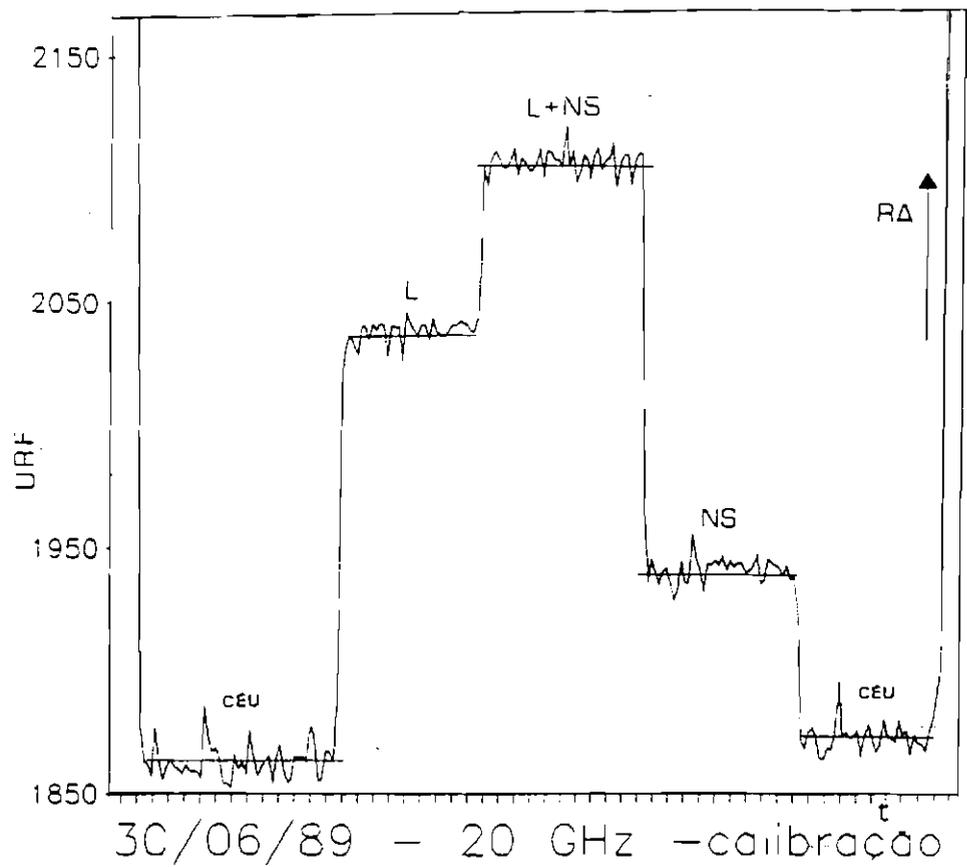


Fig. 2.7 - Curva de calibração digitalizada em unidades relativas de fluxo (URF), realizada em 30/6/1989 na frequência de 20 GHz. Onde temos o nível de sinal do "LOAD" (L), o do "NOISE SOURCE" (NS) e o da "REGIÃO ATIVA" (RA).

$$\Delta S_{\max} = 0.025 P + 3,200 \quad (\text{para } 100 \text{ ms}) \quad (2.11)$$

$$\Delta S_{\max} = 0,018 P + 2,250 \quad (\text{para } 200 \text{ ms}) \quad (2.12)$$

Os valores de sensibilidade nas outras frequências (18, 19, 20, 21 e 23) apresentam comportamento semelhante, com variação < 10 %.

Um detalhe importante é que, para  $P < 15 \%$ , a precisão de rastreamento da região ativa é pobre,  $>> 10''$  de arco, conforme a curva aproximadamente exponencial mostrada no artigo de Kaufmann et al., 1982.

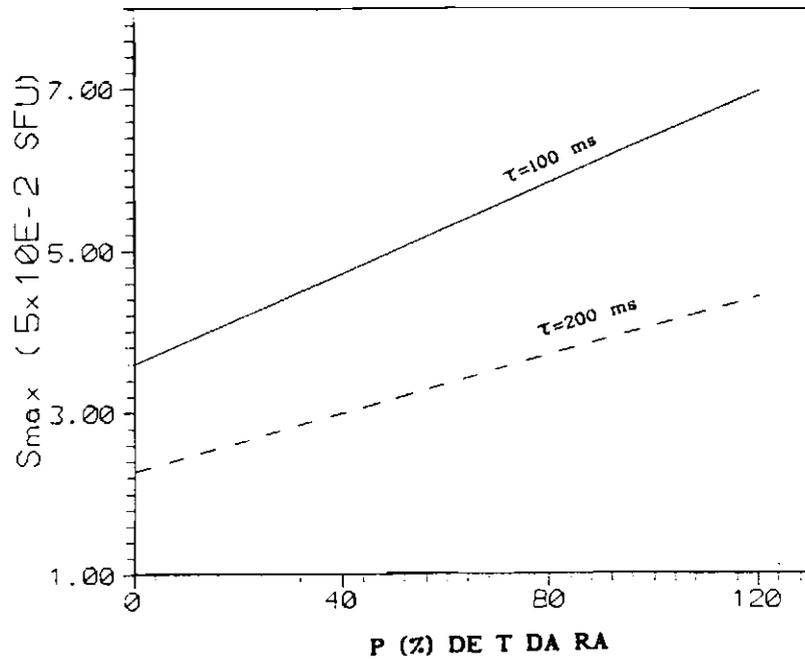


Fig. 2.8 - Curvas de sensibilidade como função da porcentagem de temperatura da região ativa, levando em consideração a temperatura do ruído. A linha cheia foi obtida para  $\tau$  igual a 100 ms e a linha tracejada para  $\tau$  igual a 200 ms.

## 2.7 - PROCEDIMENTO OBSERVACIONAL

O procedimento básico de utilização da instrumentação do ROI, para observações de explosões solares na faixa de 18 a 23 GHz, inclui o rastreamento do disco solar para confecção do mapa solar, escolha da região ativa com maior porcentagem de temperatura (em relação ao centro solar) e o rastreamento desta, com o receptor operando com resolução temporal de 0,6 s.

Efetua-se a confecção do mapa solar na frequência de 22 GHz (que corresponde à melhor resposta do receptor). Este mapa resulta de 19 varreduras do disco solar no sentido leste-oeste e vice-versa, com uma duração de 20 segundos por varredura, que resulta num disco com mais de 30' de arco representativo da distribuição completa das temperaturas do disco solar na frequência de 22 GHz. Cada varredura consiste na leitura de 20 pontos de unidades relativas de temperatura (medidos em unidades de tensão) fornecendo um mapa como o da Figura 2.9. Podemos também obter um mapa equivalente em termos das curvas de nível da temperatura do disco (Figura 2.10).

Analisando a distribuição dos valores do mapa como o da Figura 2.9 consideramos, como o *limbo solar*, o contorno do mapa com nível relativo de temperatura igual a 50. O *centro* do Sol é adotado como a região do mapa, distante do limbo, que apresenta a unidade de temperatura mais baixa em relação ao restante do disco. E, finalmente, as regiões com valores mais altos em relação ao *centro* são consideradas como representativas das *Regiões Ativas (RA)* onde há maior probabilidade, em relação ao restante do disco, de se observar explosões solares.

Para obter as coordenadas das regiões ativas, a fim de colocar o sistema para rastreá-las, primeiramente traçamos no mapa os eixos NS e EW, e efetuamos as medidas dos seus diâmetros em cm. As coordenadas das RA, em cm, são obtidas considerando as suas distâncias desses eixos, bem como o quadrante que a mesma se encontra. Por meio do programa *COORDENADAS DAS ZONAS ATIVAS* (desenvolvido pela equipe do ROI) obtemos as suas coordenadas em Ascensão Reta (AR) e Declinação (D) a partir dos valores em cm. A fim de trocar informações com outros observatórios e conferir posições e classificação (NOAA) convém ainda utilizar um outro programa (*TRANSF COORD HELIGRAF* - também desenvolvido pela equipe do ROI) para obter as coordenadas heliográficas para cada região ativa.



Fig. 2.9 - Mapa solar na frequência de 22 GHz, obtido no ROI em sua forma digitalizada.

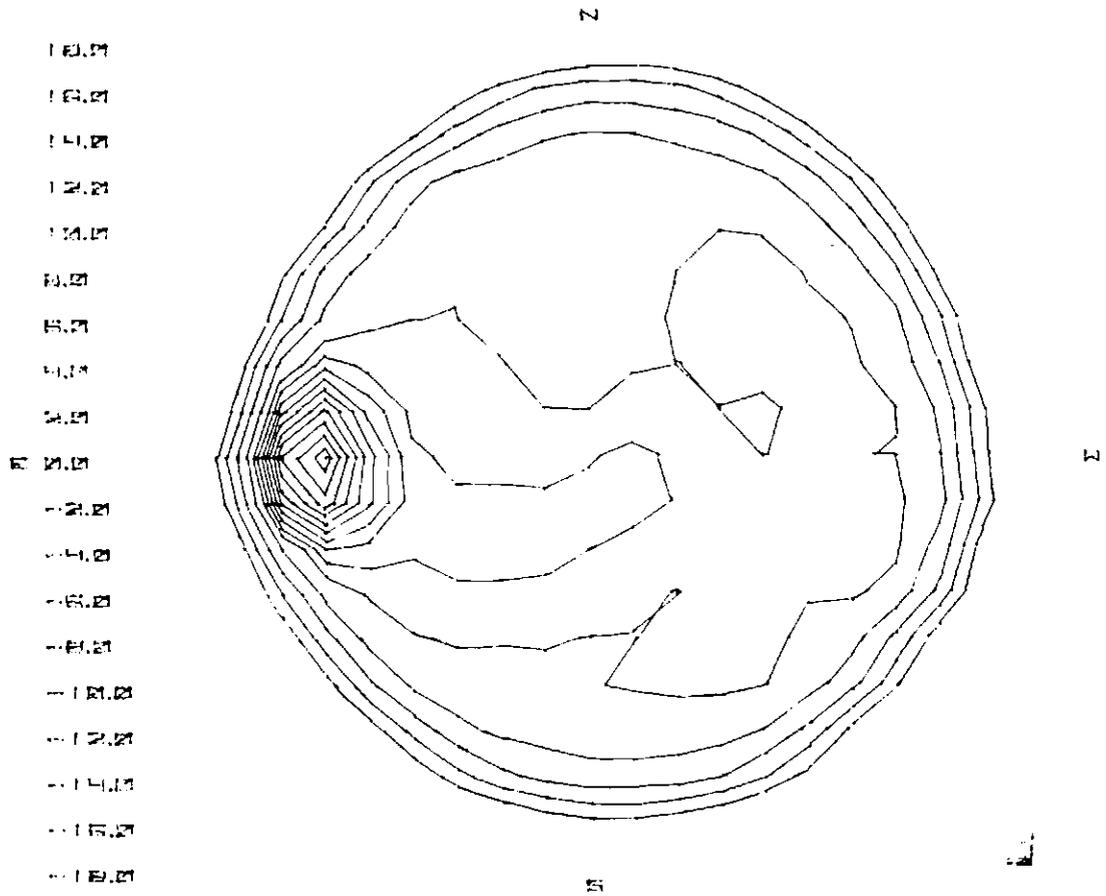


Fig. 2.10 - Mapa solar na frequência de 22 GHz, obtido no ROI, processado no seu formato analógico, composto por *isofotas*.

Uma vez determinadas as coordenadas das RA, convém escolher qual delas será rastreada. Para isso, calcula-se a porcentagem (P) por meio da expressão (2.10) apresentada na seção 2.4 (considerando neste caso as unidades relativas de temperatura). Geralmente, rastreia-se a região que apresenta maior valor de P.

O procedimento básico durante a rotina de rastreio da RA durante um dia de observação inclui: *i*) o monitoramento contínuo do sinal (papel registrador + osciloscópio); *ii*) a gravação e digitalização do mesmo; *iii*) marcas de hora cheia por meio de atenuações de 1 dB; *iv*) a realização de, pelo menos, duas calibrações para posterior conversão das unidades relativas de fluxo em Unidades de Fluxo Solar (veja figura 2.7); *v*) apontamento da antena quando necessário; *vi*) correções das possíveis saturações dos sinais (acusadas pelos *leds* indicadores do gravador Ampex); e *vii*) a observação do evento. Evidentemente, um *logbook* deve ser utilizado para a anotação minuciosa de toda a rotina observacional.

## 2.8 - PERÍODOS OBSERVACIONAIS

As observações para estudos de explosões solares, utilizando a instrumentação descrita anteriormente, estão distribuídas ao longo de 06 períodos observacionais (ver Figura 2.11). Na descrição que segue, sobre os períodos, computamos apenas o **tempo útil** de observação. Para isso, desconsideramos o tempo gasto na confecção do mapa do disco solar, as horas com o Sol em baixa elevação (devido à forte atenuação atmosférica), bem como as horas com condições meteorológicas desfavoráveis para observações de explosões solares em ondas milimétricas.

## 1) De 14 de junho a 01 de julho de 1989

Realizado simultaneamente com todos os rádio-observatórios incluídos na campanha mundial "SOLMAX 91" (ver Tabela 2.1).

Do total de 127 horas de observações resultaram 104 horas úteis com registro de  $\approx$  40 explosões ( $\approx$  30 impulsivas, 08 graduais e 02 GRF - *Gradual Rise and Fall*) ao longo dos dias 14, 15, 18, 21, 22, 28 e 30.

## 2) De 03 a 17 de maio de 1990

Realizado simultaneamente com o Caltech /OVRO (1 a 18 GHz).

Do total de 114 horas de observações resultaram 68 horas úteis com registro de 05 explosões (04 impulsivas e 01 GRF) ao longo dos dias 11, 14 e 15.

## 3) De 28 de agosto a 09 de setembro de 1990

Realizado simultaneamente com o Caltech / OVRO (1 a 18 GHz).

Do total de 92 horas de observações resultaram 80 horas úteis com registro de 05 explosões (03 impulsivas, 01 gradual e 01 GRF) ao longo dos dias 28 e 31 de agosto e 03 de setembro.

## 4) De 18 a 25 de janeiro de 1991

Realizado simultaneamente com o Caltech / OVRO (1 a 18 GHz).

Do total de 68 horas de observações resultaram 56 horas úteis com registro de 09 explosões (06 impulsivas, 01 gradual e 02 GRF) ao longo dos dias 22, 23 e 24.

## 5) De 02 a 21 de abril de 1991

Realizado simultaneamente com Caltech / OVRO (1 a 18 GHz); Metsahovi Radio Research Station-Finland (37 e 90 GHz) e Espectroscópio Decimétrico/INPE - SJC (1.6 GHz).

Do total de 160 horas de observações resultaram 118 horas úteis com registro de 05 explosões (02 impulsivas, 02 graduais e 01 GRF) ao longo dos dias 05, 09, 15, 16 e 17.

## 6) De 04 a 17 de novembro de 1991

Realizado simultaneamente com Caltech/OVRO (1 a 18 GHz) e Metsahovi Radio Research Station (37 GHz).

Do total de 120 horas de observações resultaram 109 horas úteis com registro de 02 explosões GRF nos dias 06 e 10.

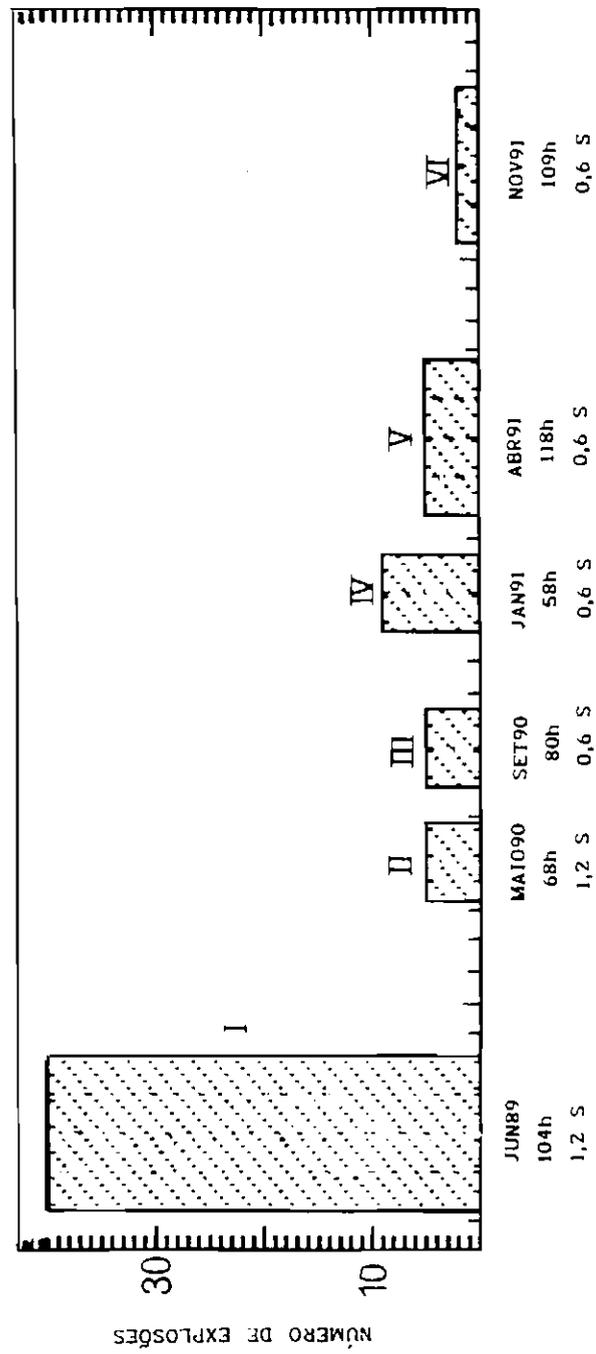


Fig. 2.11 - Distribuição dos períodos de observações de explosões solares (18-23 GHz) com resolução temporal de 200 ou 100 ms.

## 2.9 - EXPLOSÕES OBSERVADAS DISPONÍVEIS PARA ANÁLISE

Durante os períodos observacionais comentados anteriormente, observamos cerca de 45 grupos de eventos, geralmente dos tipos *Impulsivo* (eventos de curta duração, < 1 min, com tempo de subida menor que o tempo de decaimento), *Gradual* (aqueles com duração da ordem de minutos e alta intensidade) e *GRF- Gradual Rise and Fall* (duração da ordem de 10 minutos de baixa intensidade, apresentando uma lenta subida e um lento decaimento em torno da máxima intensidade). Consideramos disponíveis para uma análise todos os eventos que apresentaram:

1) *perfil temporal digitalizado* com Unidades de Fluxo Solar (UFS) e Tempo Universal (UT).

Cerca de 13 grupos de eventos ainda não foram digitalizados em unidades corrigidas (SFU X UT). Devido a não dispormos ainda de um microcomputador 286 no ROI, os eventos são digitalizados a partir das fitas magnéticas quando transportamos um 286 especificamente para a digitalização, uma vez que o gravador Ampex não pode ser deslocado do ROI para o INPE em São José dos Campos. Devido a esses contratempos nem todos os eventos foram digitalizados em unidades corrigidas. Entretanto, sempre que foi possível proceder a digitalização demos preferência aos eventos com duração menor que 1 minuto, provavelmente associados à fase impulsiva dos *flares*;

2) *perfis temporais* sem problemas de gravação, pelo menos em três frequências.

Alguns eventos, após digitalizados em unidades corrigidas (UFS X UT), podem apresentar um perfil temporal adulterado, supostamente devido a falhas momentâneas do gravador Ampex durante a digitalização (por exemplo: patinação da fita), como os perfis temporais da Figura 2.12a.

3) *perfis temporais* não atenuados ou com atenuação moderada (que não altere o perfil digitalizado).

Geralmente isso ocorre com eventos que tendem a ultrapassar os níveis de saturação para o monitoramento e por isso são atenuados manualmente pelo observador durante a ocorrência do evento. Entretanto, esses eventos podem ser recuperados posteriormente, utilizando os dados gravados no canal do controlador automático de nível (Fig. 2.12 b).

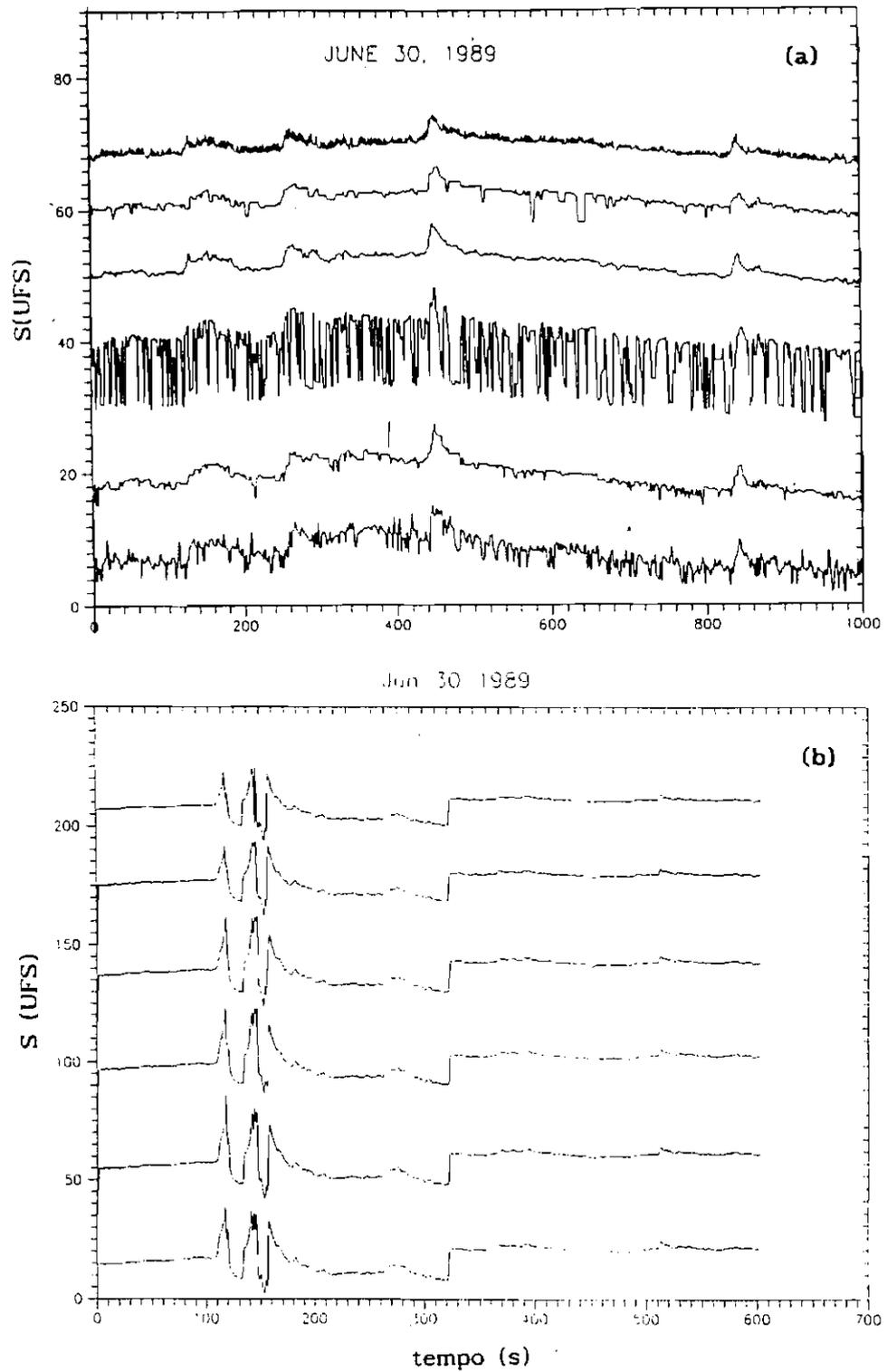


Fig. 2.12 - (a) Perfil temporal adulterado devido à falha mecânica do gravador durante a digitalização; (b) Perfil temporal atenuado durante a observação.



## CAPÍTULO 3

## ANÁLISE DAS EXPLOSÕES SOLARES (18-23 GHz)

## 3.1 - CRITÉRIOS DE SELEÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DAS EXPLOSÕES

A fim de selecionar os eventos disponíveis ( $\approx 38$  eventos individuais) introduzimos 3 tipos de critérios de seleção: 1) os critérios básicos, que seleciona a explosão *impulsiva* independentemente se esta está ou não associada com eventos observados em outras frequências; 2) os critérios de correlação, que seleciona a explosão *impulsiva* associada com eventos em outras frequências; 3) um critério alternativo, baseado na distribuição dos índices espectrais das explosões, com o objetivo de ampliar o espaço amostral das explosões *impulsivas* selecionadas.

## 3.1.1 - CRITÉRIOS BÁSICOS DE SELEÇÃO

Selecionou-se, na ordem de aplicação em que estão dispostas, o evento que apresentou:

1) amplitude de pico maior que  $3\sigma$ , onde  $\sigma$  é a amplitude pico a pico do sinal antes e depois de uma explosão solar (esse critério garantiu, numa primeira seleção, que o evento detectado fosse realmente uma emissão associada à fonte observada). **Quatro** eventos apresentaram amplitude menor que  $3\sigma$ ;

2) decaimento do fluxo com o aumento da frequências (pelo menos, para três frequências consecutivas).

Esse critério garantiu que os espectros (que serão introduzidos na seção 3.3) fossem compatíveis com a parte ópticamente fina do espectro característico da emissão de microondas. A limitação desse critério é que ao adotá-lo podemos estar desconsiderando possíveis estruturas finas superpostas ao espectro. **Sete** eventos apresentaram estruturas finas provenientes de variações em mais de três frequências;

3) duração ( $\Delta t$ )  $\leq$  1 minuto.

Para a definição da duração (tempo de subida + tempo de decaimento) adotamos o critério do *envoltório neperiano*, onde o início e o final do evento são tomados para o valor de  $S_{\max}$  dividido por 2,72 (Fig. 3.1). Explosões com essa duração, são tipicamente associadas à fase impulsiva dos *flares* quando apresentam um único pico. Cinco eventos foram descartados por apresentar duração superior a 1 minuto.

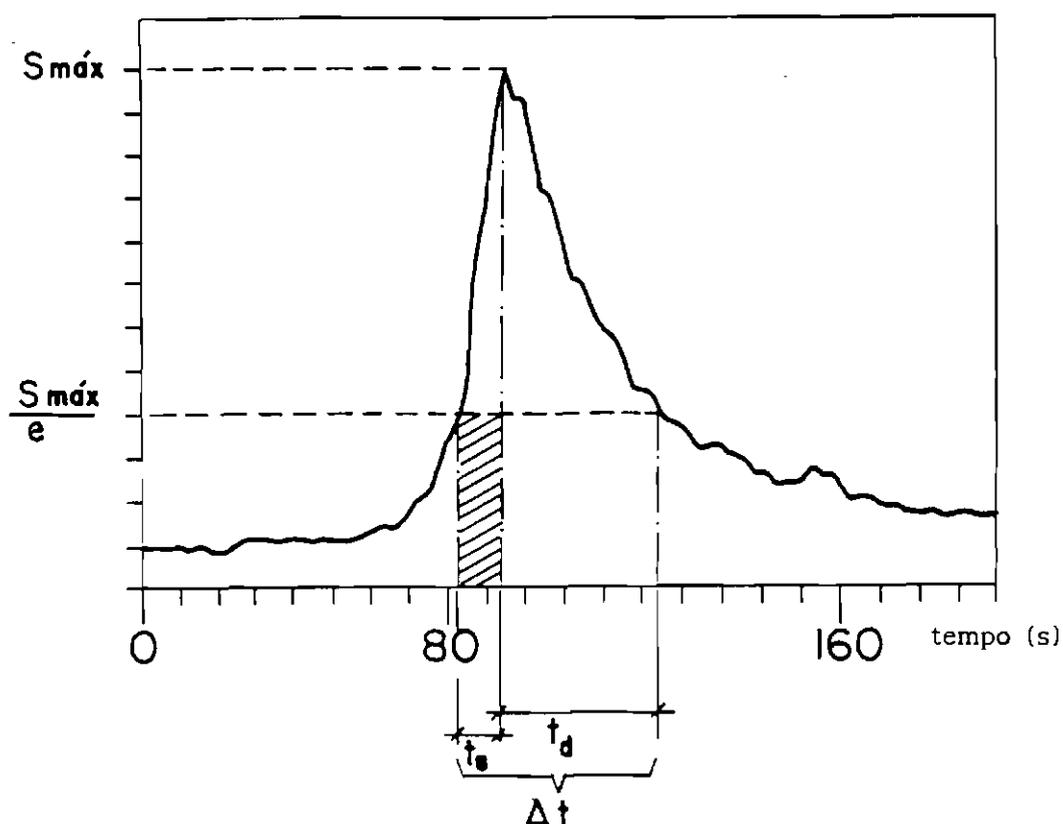


Fig. 3.1 - Perfil temporal de uma explosão com duração definida pelo envoltório neperiano, onde  $t_s$  é o tempo de subida (ou aumento) e  $t_d$  é o tempo de descida (ou decaimento).

Com a aplicação destes três critérios básicos foram selecionados 26 eventos *impulsivos*.

### 3.1.2 - CRITÉRIOS DE SELEÇÃO POR CORRELAÇÃO

O passo mais importante na seleção de um evento (candidato a ser considerado efetivamente como uma explosão solar) é certificar-se se o mesmo está bem correlacionado com eventos solares em outras faixas de frequência. Para isso, dispomos de algumas explosões impulsivas numa faixa de raios-X duros (61 - 321 keV) detectados pelo HXRBS/SMMS, cedidas pela NASA, e também dos dados publicados no periódico Solar Geophysical Data (SGD).

Utilizando o SGD e considerando o Tempo Universal de cada evento selecionado, desenvolvemos uma coleta minuciosa dos seguintes eventos: 1) *flares* solares observados em H $\alpha$  (6562 Å), 2) *radiobursts* observados em frequências discretas e 3) faixa espectral (ver Apêndice A).

#### 3.1.2.1 - PRIMEIRO CRITÉRIO DE CORRELAÇÃO

Desde o trabalho de Peterson e Winckler (1959) se reconhece a similaridade entre os perfis temporais entre microondas e raios-X duros para as explosões solares. Sabe-se que além da correlação em tempo, também há uma boa correlação entre os níveis de fluxo (Kai et al, 1985; Kai, 1986; Cliver et al, 1988 e Kosugi et al, 1988).

Dispondo de explosões em raios-X duros (61-321 keV) detectadas pelo HXRBS/SMMS, obtivemos os perfis temporais das explosões (18-23 GHz) com a mesma *escala de digitalização* dos perfis do evento em raios-X (6s/cm). Encontramos 07 explosões que apresentaram seus perfis temporais (em rádio e raio-X) bem correlacionados (Figura 3.2).

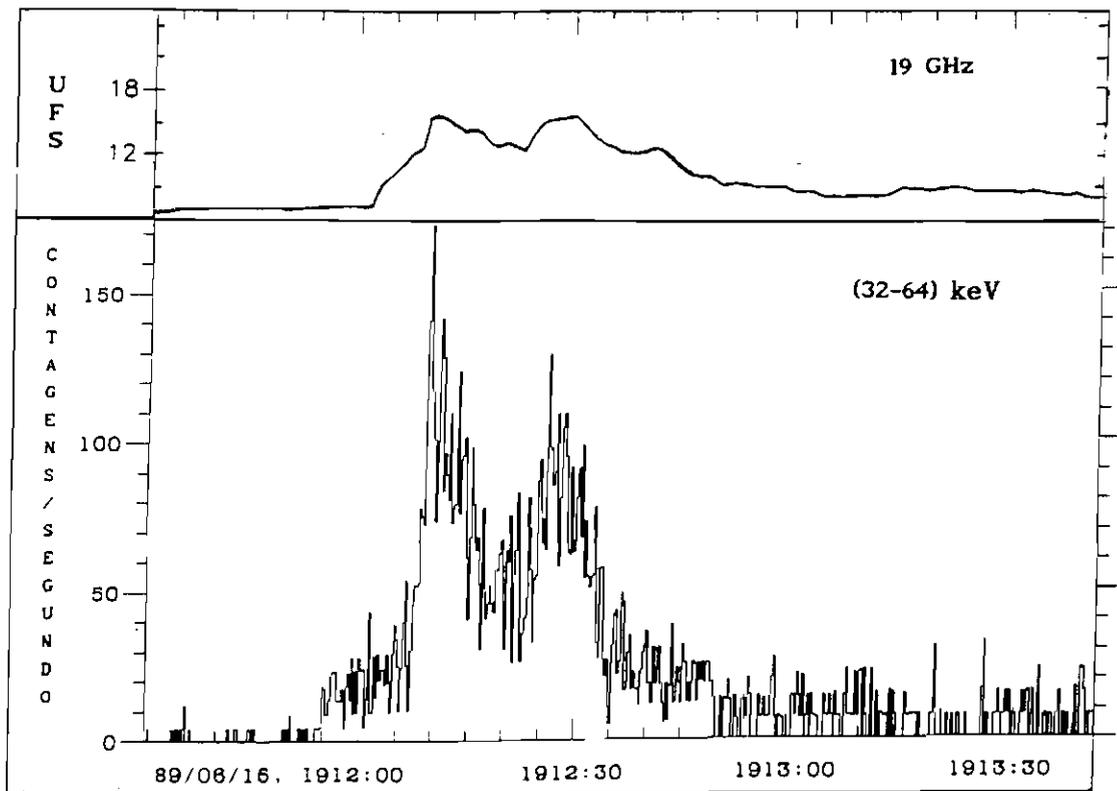


Fig. 3.2 - Perfil temporal em 19 GHz correlacionado com perfil temporal em raios - X (32 - 63 keV), para o evento observado em 15/6/1989, 19 12:15 TU.

### 3.1.2.2 - SEGUNDO CRITÉRIO DE CORRELAÇÃO

Utilizando o SGD e considerando o Tempo Universal de cada evento selecionado, desenvolvemos uma coleta minuciosa dos seguintes eventos: (i) *flares* solares observados em  $H\alpha$  (6562 Å), (ii) *radiobursts* observados em frequências discretas e (iii) faixa espectral (ver Apêndice A).

Com os valores da densidade de fluxo para os *radiobursts* observados em frequências discretas nos foi possível construir a curva espectral geral (incluindo a parte de baixas frequências) para 9 eventos (ver exemplo da Figura 3.3). Nessas curvas, encontramos a frequência de pico ( $f_p$ ) na faixa entre 7,5 e 12,0 GHz, apresentando um valor médio igual a 8,6 GHz.

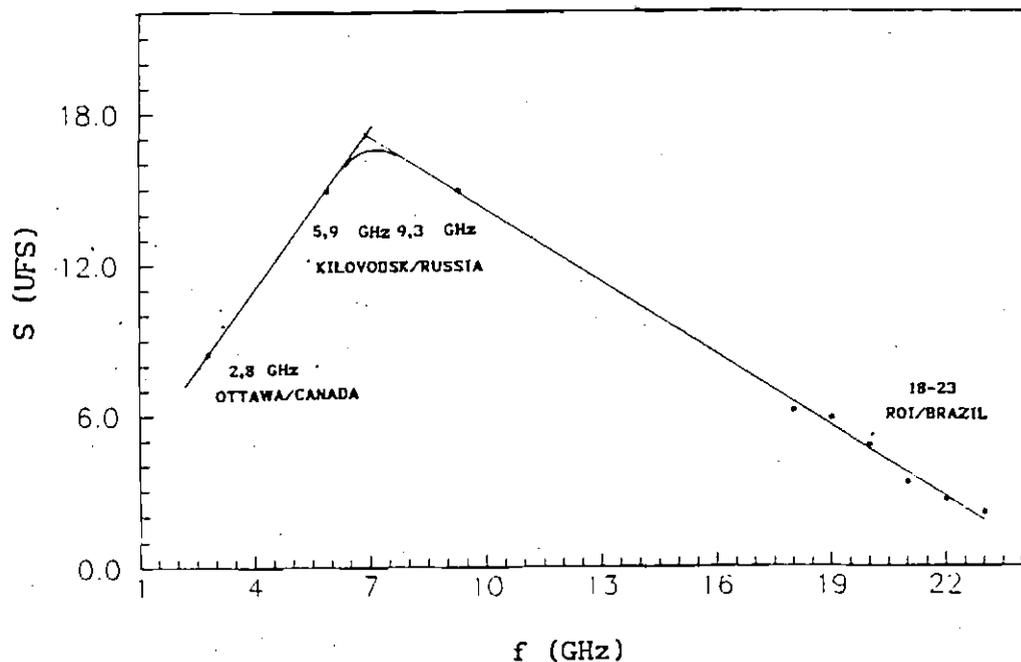


Fig. 3.3 - Espectro característico de emissão *gyrosincrotron*, construído com as densidades de fluxo de 18 a 23 GHz juntamente com densidades de fluxo medidas em outras frequências, para a explosão do dia 14/6/1989,  $\approx$  12 50 TU.

### 3.1.3 - CRITÉRIO ALTERNATIVO DE SELEÇÃO

Os dois *critérios de correlação* mais "fortes" são aqueles com raios-X e *radiobursts*, uma vez que selecionam as explosões que estão correlacionadas com eventos de maior importância física (*radiobursts* e raios X *duros*). Considerando portanto essas correlações, selecionamos 16 das 26 explosões impulsivas selecionadas pelos critérios básicos. Entretanto, dispomos ainda de 10 explosões tratadas, que podem ser incluídas no conjunto das explosões que serão estudadas. Desta forma, introduzimos um *critério alternativo* de seleção com base nos valores do índice espectral de todas as explosões.

A partir dos perfis temporais (18-23 GHz) das 26 explosões selecionadas pelo *primeiro critério de correlação*, encontramos o valor da densidade de fluxo máxima ( $S_{\max}$ ) para cada frequência e construímos o espectro (representado pela melhor reta ajustada à distribuição dos pontos - ver Apêndice C) para cada uma das explosões observadas na faixa de 18 a 23 GHz (Figuras 3.4a e 3.4b).

Calculamos então o índice espectral ( $\beta$ ) para cada rádioespectro por meio da seguinte relação :

$$\beta = [ \log (S_2 / S_1) / \log (f_2 / f_1) ], \quad \text{com } f_2 > f_1 \quad (3.1)$$

A partir dos valores dos  $\beta$  das 16 explosões selecionadas pelos critérios de correlação, construímos o histograma da distribuição dessas explosões por faixa de índice espectral.

Posteriormente, construímos um histograma semelhante para os 10 eventos selecionados apenas pelos critérios básicos.

Selecionamos então todos os eventos distribuídos na faixa comum de índices espectrais entre os dois histogramas (figura 3.5).

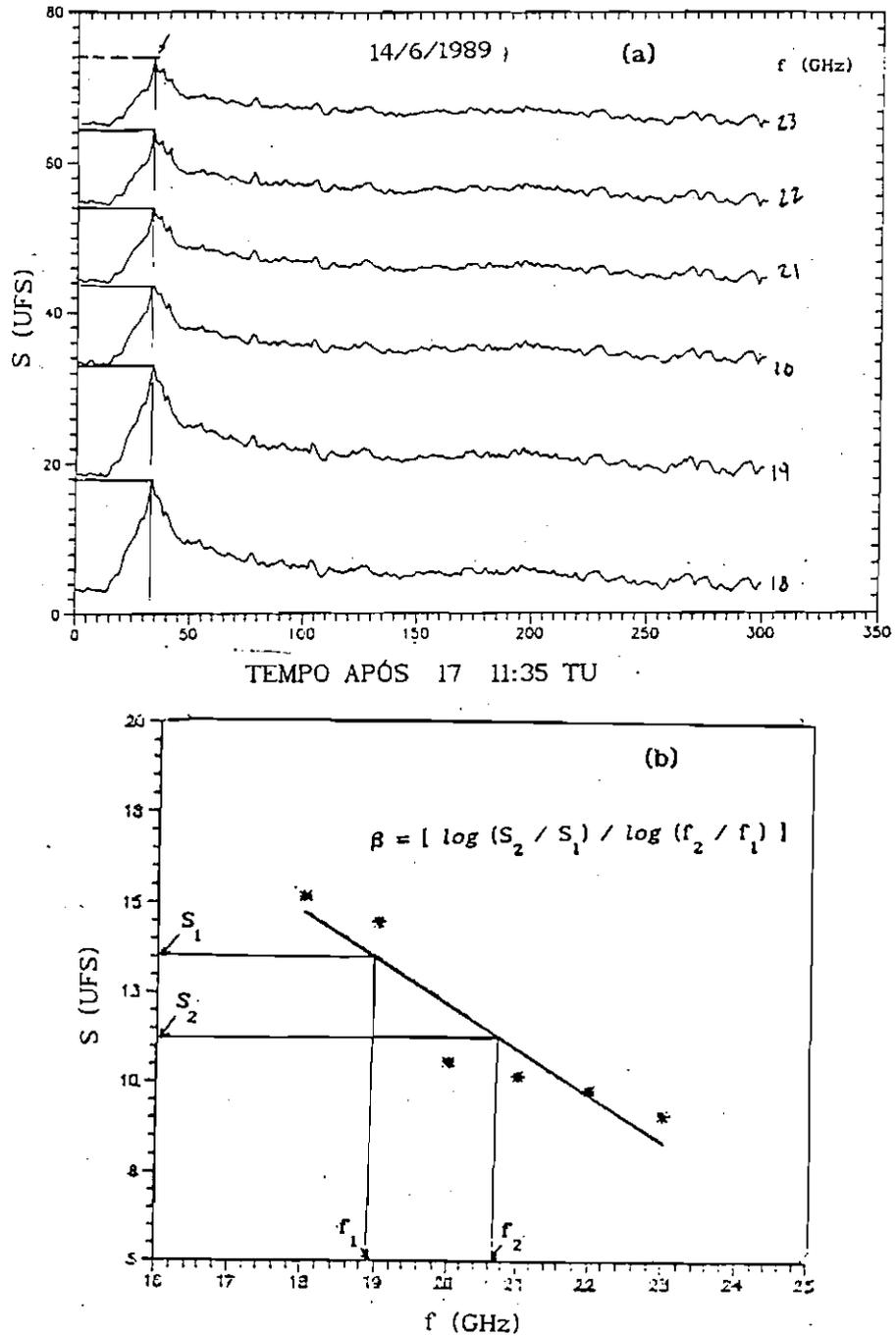


Fig. 3.4 - (a) Perfis temporais (18 a 23 GHz) para a explosão do dia 14/6/1989 ( $\approx 17$  12 TU); (b) espectro obtido a partir das densidades de fluxo máximas medidas no perfil temporal, onde  $S_1$ ,  $f_1$ ,  $S_2$  e  $f_2$  são valores escolhidos para o cálculo do índice espectral  $\beta$ .

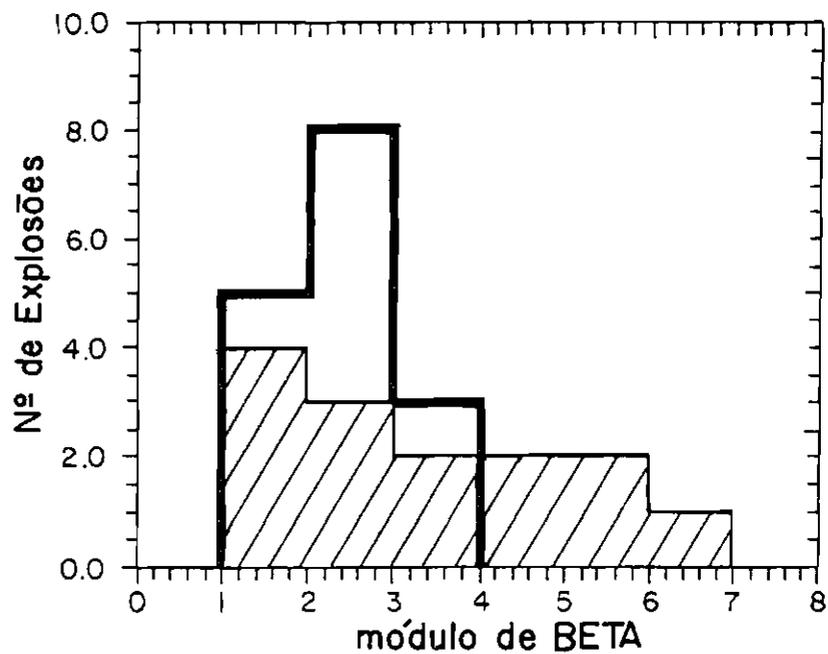


Fig. 3.5 - Distribuições das explosões em função dos valores absolutos dos seus índices espectrais  $\beta$ , onde o histograma hachurado corresponde às explosões selecionadas apenas pelos critérios básicos de seleção, e o não-hachurado corresponde àquelas selecionadas pelos critérios de correlação

Incluímos, por meio deste critério alternativo, mais 7 explosões. Ficamos portanto, com um conjunto de 23 explosões solares impulsivas na faixa de 18 a 23 GHz, disponível para a realização dos estudos que nos propomos a realizar.

### 3.2 - EXPLOSÕES IMPULSIVAS DO TIPO SIMPLES

Após a seleção das 23 explosões impulsivas, nos preocupamos em classificá-las a partir das características dos seus perfis temporais, que podem sugerir algumas considerações sobre a fonte de emissão.

Van Beek et al. (1974) introduziram o conceito de explosão solar elementar, considerando que a energia do *flare* é liberada em explosões discretas com duração da ordem de segundos. Isso sugere que um *flare* pode ser o resultado da composição de várias explosões elementares, conhecidas como *Elementary Flare Bursts (EFB)*. Na faixa de microondas esses *EFBs* de pequena intensidade foram denominados de *explosões simples*, identificadas nos perfis temporais observados em 22 GHz (Kaufmann et al., 1985).

De acordo com o Solar Geophysical Data as *explosões simples* são classificadas nos seguintes tipos:

1) *S 1* : aquelas de curta duração (convencionamos  $\Delta t < 10$  s para as nossas explosões) apresentando uma única estrutura (Figura 3.6a). São eventos possivelmente associados a uma injeção discreta de elétrons relacionados com os *Elementary Flare Bursts*.

2) *S 2* : aquelas de maior duração (convencionamos  $\Delta t > 10$  s) apresentando uma única estrutura (Figura 3.6b).

3) *S1F* ou *S2F*: *simple 1* ou *2* apresentando pequenas estruturas superpostas (Fig. 3.6c). Possivelmente interpretada como uma superposição de duas ou mais explosões simples (*S 1*).

Das 23 explosões impulsivas selecionadas 16 são explosões simples (04 do tipo *S1*, 06 do tipo *S2* e 06 do tipo *S2F*). As 07 restantes foram classificadas nos seguintes tipos:

1) Cinco explosões do tipo *complexo (C)*: aquelas com duração maior de 10 segundos que apresentam várias estruturas finas (pequenos picos) superpostas (Figura 3.6d). Possivelmente interpretada como a superposição de várias explosões do tipo simples.

2) Duas explosões do tipo *peculiar* (P): aquelas com uma estrutura do tipo S1 superposta a um evento GRF (Figura 3.6e).

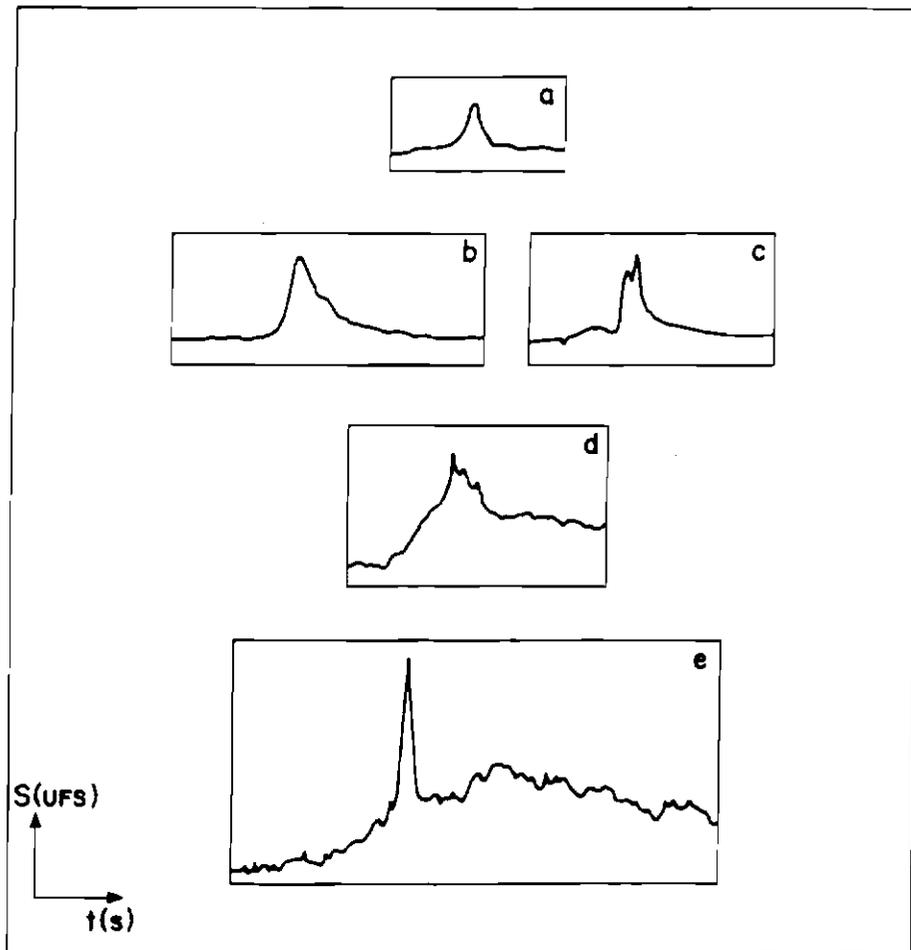


Fig. 3.6 - Tipos de perfis temporais das explosões solares impulsivas observadas na faixa de 18 a 23 GHz. (a) tipo S1, (b) tipo S2, (c) tipo S2F, (d) tipo C e (e) tipo P.

Na tabela 3.1 encontramos os parâmetros característicos de cada explosão ( $UT$ ,  $\Delta t$ ,  $\beta$ ,  $S_{max}$ , entre outros), além do tipo, conforme a classificação descrita acima.

TABELA 3.1 - EXPLOSÕES SOLARES IMPULSIVAS SELECIONADAS

	DATA	UT $\approx$	TIPO	$t$ (s) s	S(UFS) 22 GHz	$\beta$	CORREL. C/ RX
(1)	14/6/89	12:51	S2F	28	2,6	-3,2	ok
(2)	14/6/89	16:55	C	09	3,9	-2,3	ok
(3)	14/6/89	17:11	S2F	10	9,8	-2,1	-
(4)	14/6/89	17:55	S2	05	65,0	-1,5	-
(5)	15/6/89	19:11	S1	10	7,0	-7,0	ok
(6)	18/6/89	18:58	S2	04	38,0	-4,0	-
(7)	22/6/89	14:03	S2F	08	28,0	-2,2	-
(8)	22/6/89	14:40	C	20	5,0	-1,8	ok
(9)	28/6/89	16:10	S2F	03	4,7	-1,9	-
(10)	30/6/89	16:43	S2	01	2,5	-1,5	ok
(11)	30/6/89	16:47	S1	03	2,2	-2,3	ok
(12)	30/6/89	17:21	C	24	10,5	-3,3	ok
(13)	30/6/89	17:43	S1	02	3,6	-2,1	-
(14)	30/6/89	17:46	S2F	04	86,0	-1,5	-
(15)	03/3/90	13:40	P	01	3,4	-1,8	-
(16)	22/1/91	16:51	C	26	20,0	-3,5	-
(17)	23/1/91	13:03	S2	08	22,4	-1,4	-
(18)	23/1/91	14:37	S2	06	16,0	-3,8	-
(19)	24/1/91	13:10	S1	04	4,4	-0,8	-
(20)	24/1/91	14:08	S2F	20	15,0	-5,0	-
(21)	24/1/91	17:16	C	25	8,0	-4,8	-
(22)	24/1/91	18:50	S2	05	26,0	-4,4	-
(23)	17/4/91	16:57	P	04	32,0	-3,7	-

### 3.3 - ANÁLISE ESPECTRAL

Para uma dada explosão solar impulsiva, observada na faixa de 18 a 23 GHz, definimos como *ANÁLISE ESPECTRAL*, a série de procedimentos descritos a seguir:

1) Construção do Rádioespectro e Cálculo do Índice Espectral ( $\beta$ ). Como explicados na Seção 3.1.

2) Evolução Temporal do Espectro (18-23 GHz)

Afim de obter a evolução do espectro no tempo, consideramos nos perfis temporais, outros valores da densidade de fluxo além daquele correspondente ao  $S_{\max}$ . Tomamos valores da densidade de fluxo ( $S$ ) para dois instantes (em UT) antes do  $S_{\max}$  e valores de  $S$  também para dois instantes após o  $S_{\max}$ . Obtivemos assim um conjunto de cinco curvas espectrais para cada evento: duas correspondendo à parte de aumento do perfil temporal, uma ao ápice e outras duas à parte de decaimento (Fig. 3.8a e 3.8b).

3) Evolução Temporal do Índice Espectral (18-23 GHz)

A partir da expressão 3.1, calculamos o valor de  $\beta$  para cada uma das cinco curvas. Obtivemos assim um conjunto de cinco valores para  $\beta$ , que será plotado em função do tempo (Figura 3.9).

Construímos a evolução temporal para todas as explosões impulsivas do tipo simples como mostrado na Figura 3.10.

A *análise espectral* desenvolvida nesta seção foi apresentada apenas como um dos passos do *tratamento* das explosões. A motivação para realizá-la reside no grande número de informações que o comportamento espectral pode fornecer sobre a fonte de emissão (como será notado no Capítulo 4 desta dissertação). Além disso, é a primeira vez que se realiza uma investigação espectral de explosões solares para frequências superiores a 18 GHz, podendo dessa forma trazer informações adicionais sobre a parte de altas frequências do espectro, ainda muito pouco investigada.

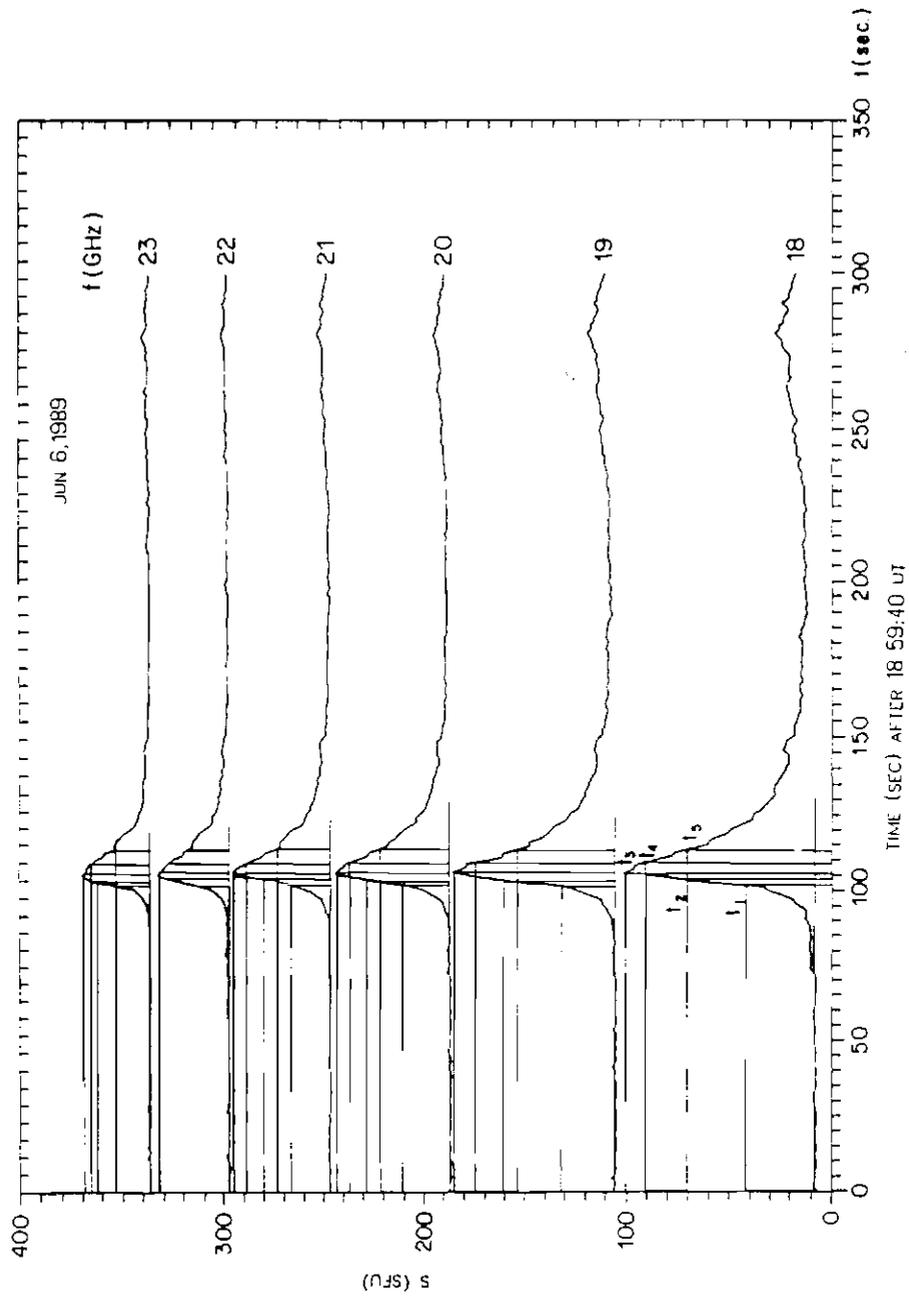


Fig. 3.7 - Perfis temporais para a explosão solar observada no dia 18/6/89 ( $\approx 18\ 59\ TU$ ), com o radiômetro (18-23 GHz). São tomadas medidas da densidade de fluxo para cinco instantes em cada frequência.

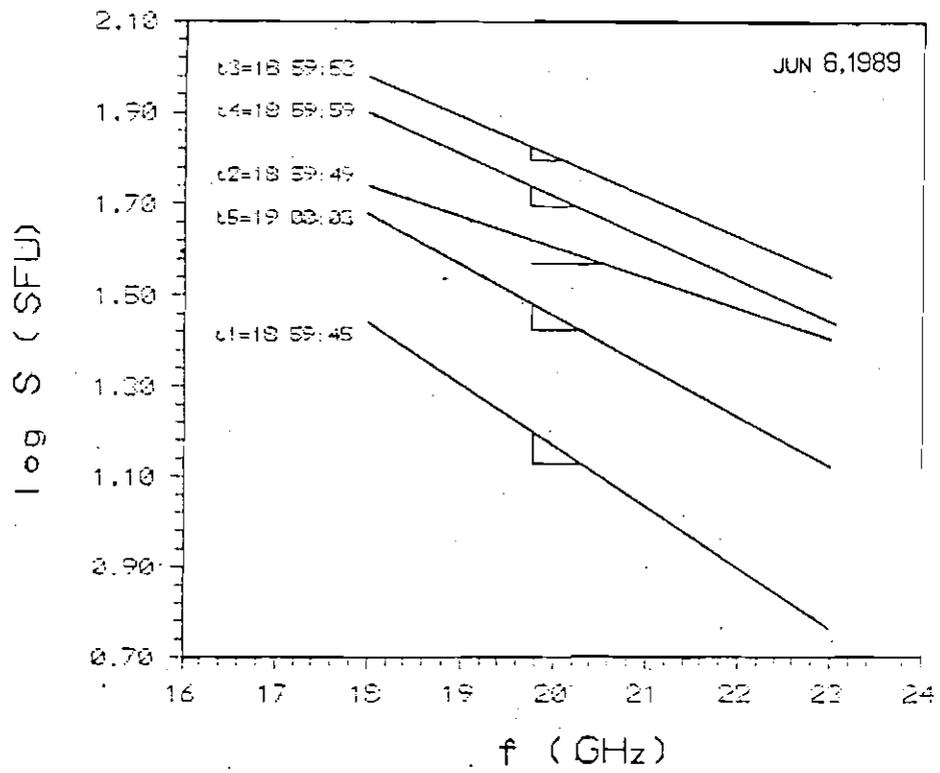


Fig. 3.8 - Evolução temporal do espectro para a explosão solar da Figura 3.7.

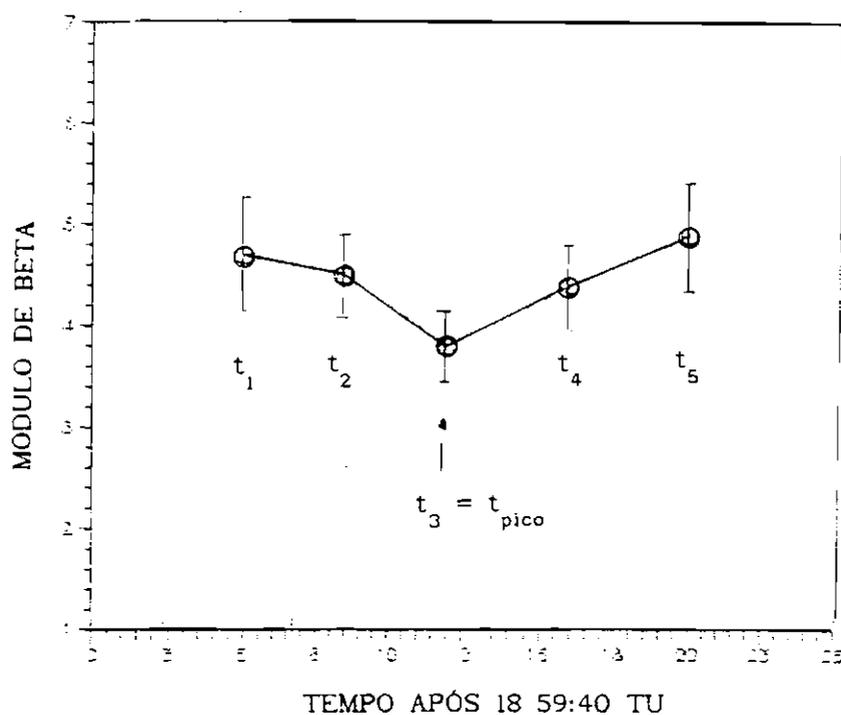


Fig. 3.9 - Evolução temporal do índice espectral obtido a partir dos espectros da Figura 3.8.

### 3.3.1 - CONSIDERAÇÕES SOBRE AS BARRAS DE ERRO DO ÍNDICE ESPECTRAL RÁDIO ( $\Delta\beta$ ):

As barras de erro para os valores do índice espectral  $\beta$  foram determinadas a partir das equações das retas ajustadas para representar os espectros. Utilizamos o "Fitting Data to a Straight Line" do *Numerical Recipes* (Press et al, 1988), que fornece a equação da melhor reta incluindo os desvios tanto para as variáveis como para as constantes da equação ( $y = a + bx$ ). Nesse caso ficamos com  $\log S_1 = (a \pm \sigma_a) + (b \pm \sigma_b) \log f_1$ , onde o índice espectral  $\beta$  é o parâmetro  $b$  e o  $\sigma_b$  o seu desvio padrão. No Apêndice C apresentamos o *Software* usado para esse ajuste, bem como uma tabela com os valores encontrados para  $\beta$  e  $\Delta\beta$ .

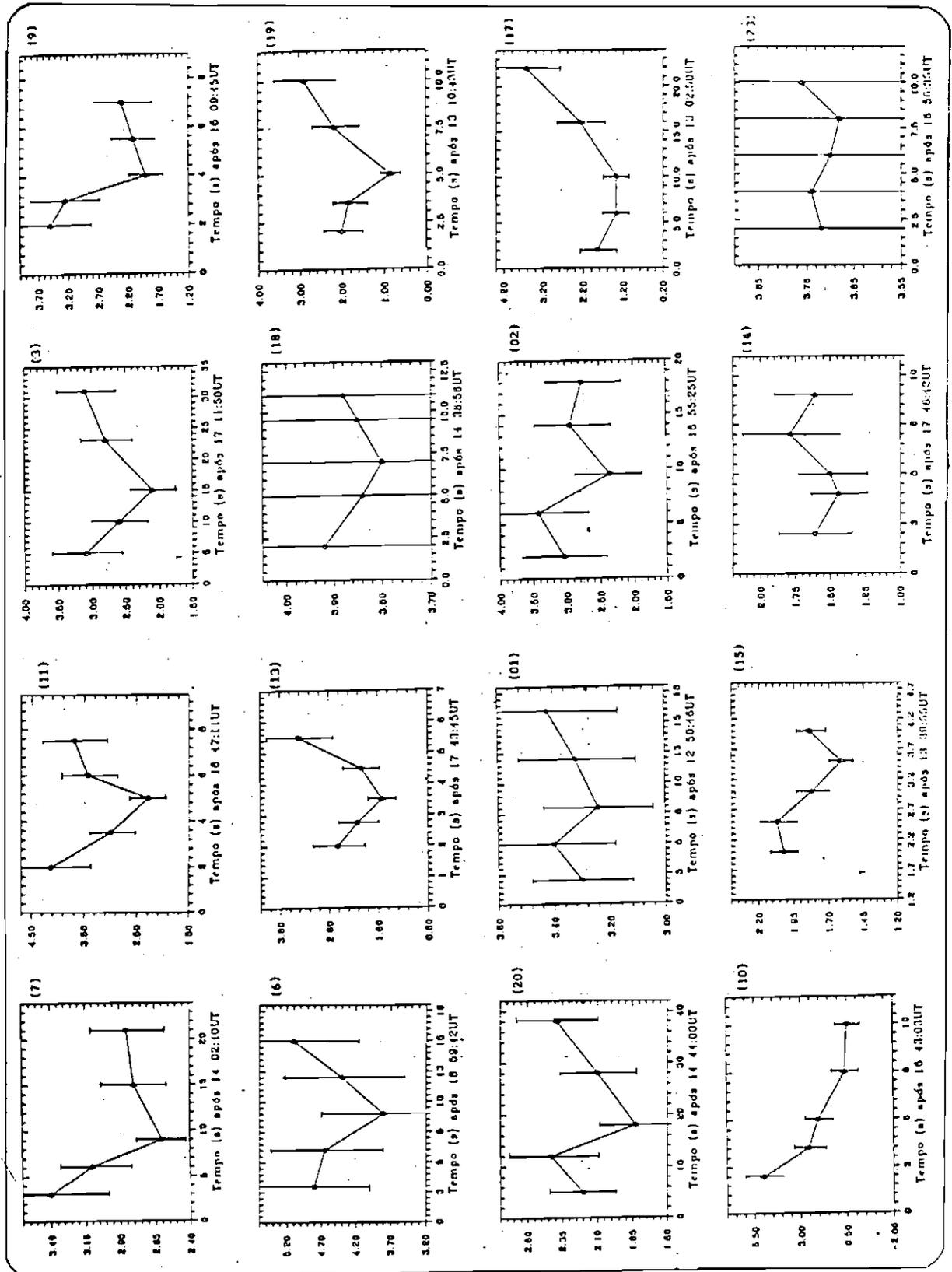


Fig. 3.10 - Curvas de evolução temporal do módulo de  $\beta$  para as 16 explosões impulsivas do tipo simples, numeradas conforme a Tabela 3.1.

## CAPÍTULO 4

### ESTUDOS DE EXPLOSÕES SOLARES IMPULSIVAS (18-23 GHz)

Para os estudos que foram desenvolvidos consideramos como ponto de partida, os perfis temporais e as características espectrais de 16 explosões solares impulsivas do tipo simples observadas na faixa de 18 a 23 GHz, além das características dos 07 eventos impulsivos observados em raios-X duros pelo SMMS (nos cedidos pela NASA).

#### 4.1 - ESTUDOS DAS EXPLOSÕES (18-23 GHz) ASSOCIADAS COM RAIOS-X DUROS

Na Tabela 4.1 temos as seguintes características desses 07 eventos correlacionados: *data*, *tempo universal (TU)*, *o índice espectral em microondas ( $\beta$ )*, *o índice espectral em raios-X duros ( $\gamma$ )*, *a densidade de fluxo UFS para 22 GHz (FR)*, *o fluxo integrado de raios-X duros em contagens por segundo (FX)*, *o canal de energia mínima ( $\mathcal{E}_{\min}$ )* e *de energia máxima ( $\mathcal{E}_{\max}$ )*.

##### 4.1.1 - ENERGIAS DOS ELÉTRONS EMISSORES

Os eventos em raios-X duros observados pelo HXRBS, são geralmente detectados em 15 canais de energias entre  $\approx 30$  keV e  $\approx 500$  keV. Os perfis temporais são apresentados em função dos vários canais pelos quais a explosão foi detectada. Para as energias iniciais (mínimas) o fluxo em raios-X (em contagens por segundo) é maior que para as energias finais (máximas), em relação à amplitude do ruído de fundo (Figura 4.1).

A faixa de energia final é considerada quando o fluxo em raios-X (FX) já não ultrapassa o dobro da amplitude do ruído, isto é,  $FX < 2\sigma$ , e portanto, pode ser considerada como a energia máxima dos elétrons emissores. Entretanto, a faixa da energia inicial dos elétrons emissores não pode ser considerada a partir da faixa de energia mínima (canal inicial), pois, além da variação temporal da resposta do detector (Dennis et al., 1985), as explosões das quais dispomos estão compreendidas no canal de 52 a 61 keV, e, como se sabe, a emissão em raios-X duros pode iniciar-se com energias a partir de 10 keV.

TABELA 4.1 - EXPLOSÕES EM MICROONDAS E RAIOS-X CORELACIONADAS

DATA	TUP $\approx$	$\beta$	$\gamma$	FR(22GHz)	FX(Cont/s)	$\varepsilon_{\min}(\text{keV})$	$\varepsilon_{\max}(\text{keV})$
14/6/89	12:51	-3,2	4,7	2,6	155	52-61	61-102
14/6/89	16:55	-2,4	5,7	3,9	45	52-61	61-102
15/6/89	19:12	-7,0	6,9	7,3	110	?	231-275
22/6/89	14:40	-1,8	3,6	5,0	85	52-61	102-144
30/6/89	15:00	-2,2	3,4	4,1	1965	52-61	275-321
30/6/89	17:21	-3,3	5,0	10,5	60	52-61	61-102
30/6/89	17:43	-2,1	6,4	3,6	35	52-61	61-102

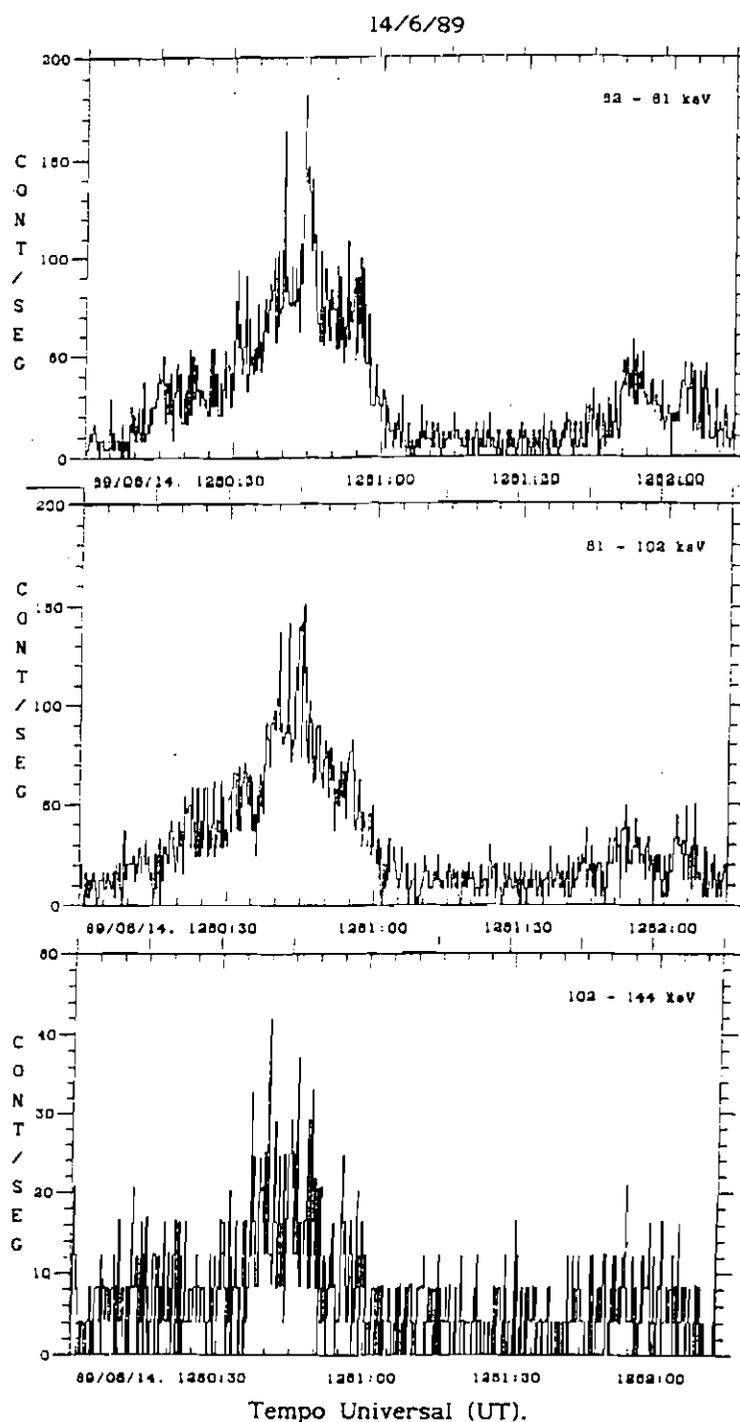


Fig. 4.1 - Perfis temporais para evento em raio x duros detectado desde o canal de 52-61 keV até o canal 102-144 keV, em 14/6/1989 pelo HXRBS/SMMS.

Utilizando as 07 explosões de raios-X duros associadas com as explosões impulsivas na faixa de 18 a 23 GHz, estimamos uma faixa para a energia máxima dos elétrons emissores de raios-X. Construindo a distribuição dos eventos em função das energias máximas, estimamos a faixa de energia entre 82 e 275 keV (Figura 4.2).

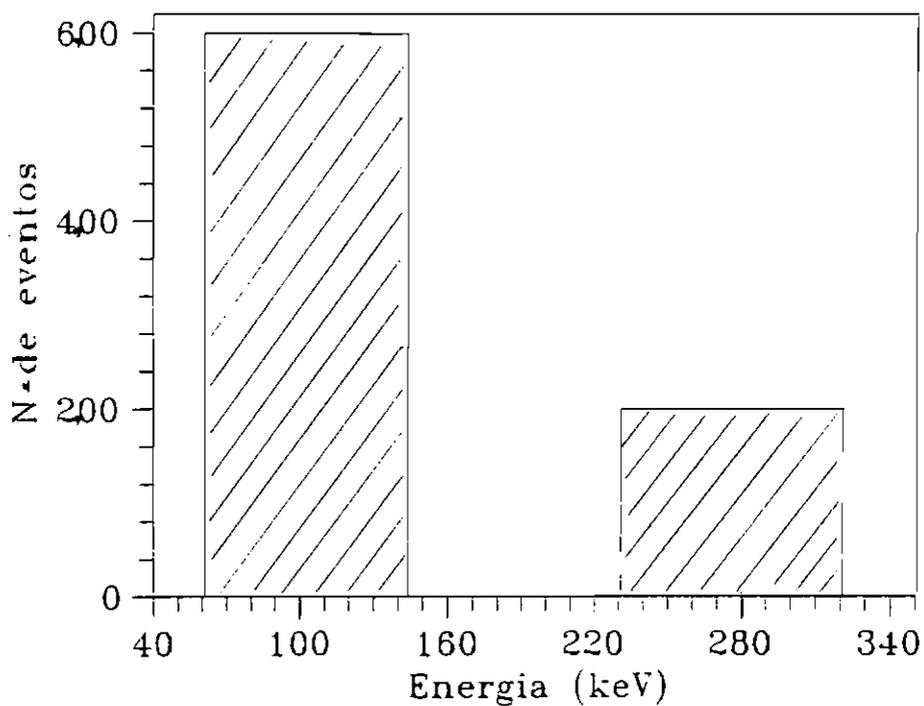


Fig. 4.2 - Distribuição das explosões de raios-X duros em função dos vários canais de energias em que foram detectados.

#### 4.1.2 - RELAÇÃO ENTRE OS ÍNDICES ESPECTRAIS

Os índices espectrais comumente mencionados nos estudos de explosões solares em microondas e raios-X duros são:

1)  $\delta$ : índice espectral para a energia dos elétrons com distribuição de lei de potência, tal que

$$N(\mathcal{E}) = K \mathcal{E}^{-\delta} \quad (4.1)$$

onde  $\mathcal{E}$  é a energia média da população de elétrons emissores,  $N$  é a densidade desses elétrons por  $\text{cm}^{-3}$  e  $K$  é uma constante de proporcionalidade.

2)  $\gamma$ : índice espectral para o espectro de raios-X (sem considerar relação com *flare*), tal que

$$\gamma = \delta + 0,5, \text{ para o chamado modelo com "alvo fino"} \quad (4.2)$$

$$\gamma = \delta - 1,0, \text{ para o chamado modelo com "alvo espesso"} \quad (4.3)$$

Kosugi, Dennis e Kai (1988), considerando que o evento está relacionado com a fase impulsiva do *flare*, reescreveram a relação (4.4) como

$$\gamma = \delta - 1,5 \quad (4.4)$$

3)  $\beta$ : índice espectral para o espectro de microondas (também denotado como  $\gamma$  por Kaverin, 1979 e como  $\alpha$  por Schochlin e Magun, 1980), tal que

$$S \propto f^{\beta}, \text{ para } f < f_p \quad (4.5)$$

$$S \propto f^{-\beta}, \text{ para } f > f_p \quad (4.6)$$

onde  $S$  é a densidade de fluxo,  $f$  a frequência observada e  $f_p$  a frequência de pico (todas em unidades arbitrárias).

Para o caso da emissão *gyrosynchrotron* não-térmica (Figura 4.3), temos a seguinte relação (Dulk e Marsch, 1982)

$$S \propto f^{1,22-0,90\delta} \quad (4.7)$$

que nos fornece uma relação direta entre os índices espectrais  $\beta$  e  $\delta$ , tal que

$$\beta = 1,22 - 0,90 \delta. \quad (4.8)$$

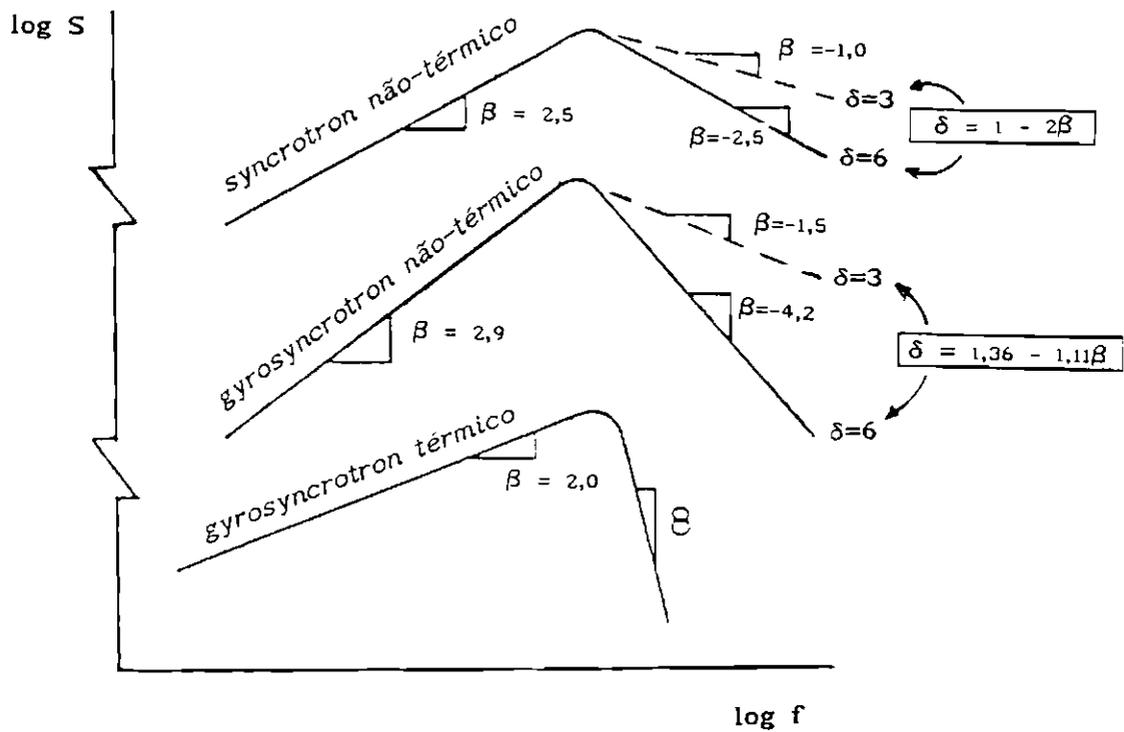


Fig. 4.3 - Curvas características da emissão *giromagnética*, para os casos térmico e não-térmico. FONTE: Dulk e Marsh (1982), p. 67.

A partir da expressão 4.5, podemos obter os valores para o índice espectral  $\delta_\gamma$ , uma vez que temos os valores medidos de  $\gamma$ , tal que

$$\delta_\gamma = \gamma + 1,5 \quad (4.9)$$

e a partir da expressão 4.9, também podemos obter os valores para o índice espectral  $\delta_\beta$ , uma vez que temos os valores de  $\beta$  calculados diretamente dos espectros pela expressão (3.1), tal que

$$\delta_\beta = (1,22 - \beta)/0.90 \quad (4.10)$$

Na Tabela 4.2, temos os valores de  $\gamma$ ,  $\beta$ ,  $\delta_\gamma$  e  $\delta_\beta$  e as suas respectivas barras de erro. A partir da Figura 4.4 vemos que os valores de  $\delta_\gamma$  e  $\delta_\beta$  apresentam uma boa aproximação, considerando as barras  $\Delta\delta$  a partir dos desvios  $\Delta\beta$  (ver Apêndice C). Isso confirma a relação 4.9 como a lei potencial da parte de altas frequências do espectro *gyrosincrotron*.

TABELA 4.2 - CORRESPONDÊNCIA ENTRE OS ÍNDICES ESPECTRAIS

	DATA	TU	$\gamma$	$\beta$	$\delta_\gamma$	$\delta_\beta$
(1)	14/6/89	12:51	4,7 $\pm$ 0,2	-3,2 $\pm$ 0,6	6,2 $\pm$ 1,2	4,9 $\pm$ 1,0
(2)	14/6/89	16:55	5,7 $\pm$ 0,8	-4,4 $\pm$ 0,9	7,2 $\pm$ 1,4	6,2 $\pm$ 1,2
(3)	15/6/89	19:12	6,9 $\pm$ 0,4	-7,3 $\pm$ 1,5	8,4 $\pm$ 1,7	9,5 $\pm$ 1,9
(4)	22/6/89	14:40	3,6 $\pm$ 0,2	-2,2 $\pm$ 0,4	5,1 $\pm$ 1,0	3,8 $\pm$ 0,8
(5)	30/6/89	15:00	3,4 $\pm$ 0,1	-2,1 $\pm$ 0,4	4,9 $\pm$ 1,0	3,7 $\pm$ 0,7
(6)	30/6/89	14:13	3,2 $\pm$ 0,1	-1,8 $\pm$ 0,4	4,7 $\pm$ 0,9	3,6 $\pm$ 0,7
(7)	30/6/89	17:18	5,0 $\pm$ 0,4	-3,3 $\pm$ 0,6	6,5 $\pm$ 1,3	5,0 $\pm$ 1,0

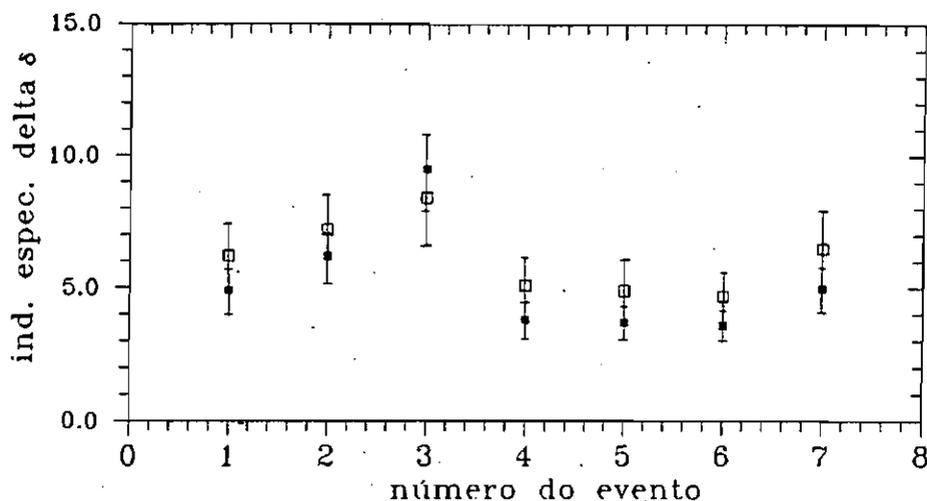


Fig. 4.4 - Valores de  $\delta_\gamma$  (□) e  $\delta_\beta$  (■) para os sete eventos da tabela 4.1.

#### 4.2 - ESTUDO SEMIQUALITATIVO DA EVOLUÇÃO TEMPORAL DO ÍNDICE ESPECTRAL

Na análise espectral desenvolvida no Cap. 3, obtivemos a evolução temporal dos índices espectrais para 16 explosões impulsivas (ver Figura 3.10). O estudo desses perfis de evolução pode fornecer informações a respeito do processo de *injeção/aceleração* dos elétrons emissores de microondas e raios-X duros (Kundu, 1965).

##### 4.2.1 - COMPORTAMENTO ESPECTRAL DURANTE A INJEÇÃO DOS ELÉTRONS EMISSORES

O processo de *injeção/aceleração* dos elétrons emissores de raios-X duros e microondas pode ser estudado através da variação temporal da energia média ( $\mathcal{E}$ ) desses elétrons. O processo é classificado como "impulsivo" quando os elétrons são acelerados apenas durante a fase de subida da explosão, ou seja, a energia atinge um valor máximo durante o tempo de subida da emissão e decresce, devido a processo colisional, durante o tempo de decaimento da emissão. Quando a energia média permanece constante durante todo o tempo de emissão o processo de *injeção/aceleração* é classificado como "contínuo", ou seja, o processo de aceleração permanece durante o tempo total da explosão.

A expressão 4.2 indica que para cada distribuição de energias teremos um valor médio ( $\mathcal{E}$ ) que se altera quando a distribuição se altera, isto é, ocorre uma variação no valor da potência  $\delta$ .

Reescrevendo a expressão 4.2 na forma

$$K = N \mathcal{E}^{+\delta} \quad (4.11)$$

notamos que a energia média da distribuição de energias varia de maneira inversa ao valor do índice espectral  $\delta$ .

Devido à  $\mathcal{E}$  e  $\delta$  estarem relacionados, o processo de *injeção/aceleração* dos elétrons emissores também pode ser classificado a partir da evolução temporal de  $\delta$ , notando-se que a curva de  $\delta$  apresentará comportamento inverso à curva de  $\mathcal{E}$  quando o processo de aceleração for impulsivo. Porém, como vimos na seção 4.1.2, o índice espectral da distribuição de energia dos elétrons ( $\delta$ ) relaciona-se com o índice espectral do espectro de microondas ( $\beta$ ) por meio da relação 4.11, mostrando que  $\delta$  e  $\beta$  possuem uma relação direta e linear (quando  $\beta$  é tomado em valor absoluto). Portanto, o processo de aceleração impulsivo pode também ser inferido a partir da evolução temporal do valor absoluto do índice espectral  $\beta$  (Figura 4.5).

#### 4.2.2 - RAZÃO DE ENDURECIMENTO DO ÍNDICE ESPECTRAL

A classificação do processo de *injeção/aceleração* por inspeção das curvas da variação temporal do índice espectral só é trivial para o caso do processo "contínuo" (quando  $\beta$  não deve variar no tempo). Entretanto, para o caso "impulsivo", devido ao comportamento diferenciado das curvas em relação à curva padrão (Figura 4.5), se faz necessário um método mais criterioso para a identificação do perfil "impulsivo". Introduzimos então um parâmetro adimensional que denominamos de **razão de endurecimento (D)**, tal que

$$D = \Delta\chi / \Delta\beta \quad (4.12)$$

onde  $\Delta\chi$  = largura de endurecimento, e  $\Delta\beta$  = barra de erro máxima (20%) do índice espectral  $\beta$ .

A largura de endurecimento ( $\Delta\chi$ ) é obtida por meio dos seguintes passos (veja Figura 4.6):

1o) determina-se a reta  $A$  unindo-se os pontos  $b$  e  $d$ , relativos aos instantes mais próximos do tempo de pico;

2o) determina-se o ponto  $f$  por meio do prolongamento da reta  $B$ , que passa pela barra de erro do ponto  $c$ ;

3o) determina-se os valores  $\beta_f$  e  $\beta_c$  por meio das retas perpendiculares  $p_1$  e  $p_2$ , respectivamente.

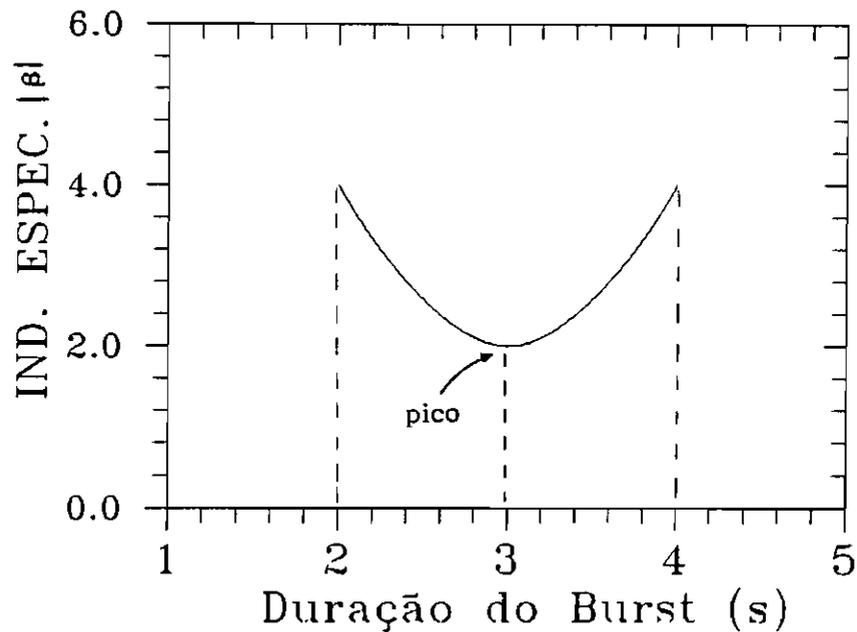


Fig. 4.5 - Curva do comportamento do módulo do índice espectral  $\beta$  durante uma explosão solar, quando o processo de aceleração dos elétrons é *impulsivo*.

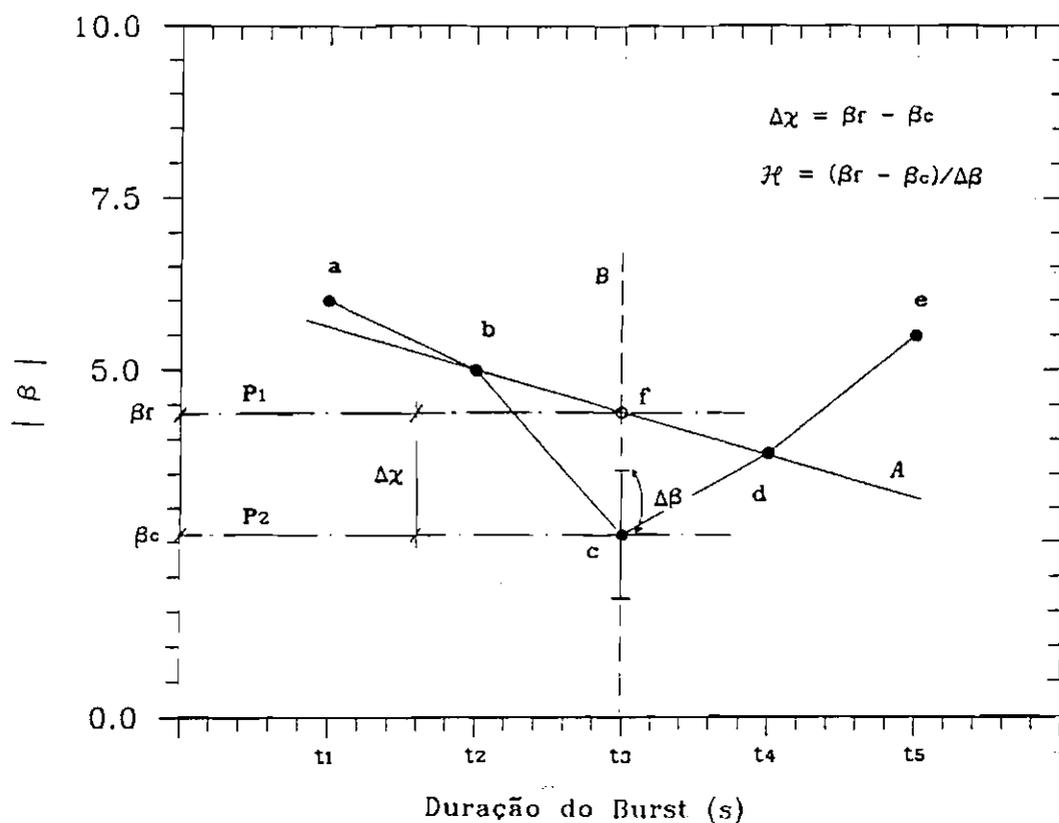


Fig. 4.6 - Descrição da determinação da *largura de endurecimento* ( $D$ ) sobre o perfil da evolução temporal do índice espectral  $\beta$ .

A largura de endurecimento é então definida pela diferença

$$\Delta\chi = \beta_r - \beta_c \quad (4.13)$$

Portanto, a *razão de endurecimento* pode ser reescrita como

$$D = (\beta_r - \beta_c) / \Delta\beta \quad (4.14)$$

E, o processo de *injeção/aceleração* será "impulsivo" quando  $D > 1$ .

Dos perfis da evolução temporal do índice espectral  $\beta$ , da Figura 3.10, dez apresentaram  $D > 1$  sugerindo que o processo de *injeção/aceleração* do tipo "impulsivo" é o predominante.

### 4.3 - ESTUDO SEMIQUALITATIVO DO ESPECTRO E DA FONTE DE EMISSÃO

#### 4.3.1 - FORMULAÇÃO E FLUXOGRAMAS

A simplicidade das equações desenvolvidas por Dulk e Marsh (1982) para a emissão *gyrosynchrotron* no modo extraordinário, de uma população não térmica de elétrons com energias entre 10 keV e 1 MeV, as tornam eficientes para uma investigação semiqualitativa tanto do espectro como da fonte da emissão solar em microondas.

As equações de Dulk e Marsh (1982) que nos interessam neste estudo são aquelas relacionadas ao coeficiente de emissão ( $\eta_f$ ) e à frequência de pico do espectro ( $f_p$  em Hz):

$$\eta_f / BN \approx 3,3 \times 10^{-24} 10^{-0,52\delta} (\text{sen}\theta)^{-0,43+0,65\delta} (f/f_B)^{1,22-0,90\delta} \quad (4.15)$$

$$f_p \approx 2.720.10^{0,27\delta} (\text{sen}\theta)^{0,41+0,03\delta} (N.L)^{0,32-0,03\delta} B^{0,68+0,03\delta} \quad (4.16)$$

onde,

L = dimensão linear da fonte em cm;

N = densidade dos elétrons emissores em  $\text{cm}^{-3}$ ;

B = campo magnético na fonte em Gauss;

$\delta$  = índice espectral da distribuição de energia dos elétrons;

$\theta$  = ângulo entre o campo B e o *vetor de Poynting*, em graus;

$(f/f_B)$  é o número de harmônicos da emissão (n), onde f é a frequência de observação e  $f_B$  a frequência fundamental, ambas em Hz.

O teste da acurácia dessas equações (Dulk e Marsh, 1982) mostrou que são válidas para os seguintes intervalos:  $2 < \delta < 7$ ;  $10 < n < 100$  e  $\theta > 20^\circ$ .

Considerando uma fonte isolada com temperatura efetiva ( $T_{eff}$ ) constante, a temperatura de brilho ( $T_b$ ) pode ser expressa como

$$T_b = T_{eff} (1 - e^{-\tau_f}) \quad (4.17)$$

onde  $\tau_f$  é a profundidade óptica do plasma.

Para o caso de uma fonte *ópticamente fina*,  $\tau_f \ll 1$ , ficamos com

$$T_b = T_{eff} \cdot \tau_f \quad (4.18)$$

que pode ser escrita em função do coeficiente de emissão ( $\eta_f$ ), da frequência ( $f$ ) e da dimensão linear da fonte ( $L$ ), como

$$T_b = (c^2/k) \cdot f^{-2} \cdot \eta_f \cdot L \quad (4.19)$$

A expressão para a densidade de fluxo ( $S$ ) pode ser escrita como

$$S = (k/c^2) \cdot f^2 \cdot T_b(f) \cdot \int d\Omega \quad (4.20)$$

onde  $\int d\Omega$  é o ângulo sólido diferencial integrado sobre a área total da fonte projetada.

Substituindo a equação (4.19) na equação (4.20) ficamos com

$$S = L \cdot \eta_f \cdot \int d\Omega \quad (4.21)$$

Podemos reescrever a equação 4.15 como,

$$\eta_f \approx 3,30 \cdot 10^{-24} \cdot 10^{-0,52\delta} \cdot (\text{sen } \theta)^{-0,43+0,65\delta} \cdot n^{1,22-0,9\delta} \cdot \text{N.B} \quad (4.22)$$

Substituindo a expressão (4.22) na (4.21) obtemos finalmente,

$$S \approx L \cdot \text{N.B.} \left[ 3,3 \cdot 10^{-24} \cdot 10^{-0,52\delta} (\text{sen } \theta)^{-0,43+0,65\delta} \cdot n^{1,22-0,9\delta} \right] \cdot \int d\Omega \quad (4.23)$$

em unidades do sistema CGS.

Considerando a área da projeção da fonte igual a  $\pi(L/2)^2$  e a distância de 1 UA  $\approx 1,50 \times 10^{13}$  cm, podemos escrever o ângulo sólido  $\int d\Omega$  da seguinte maneira,

$$\int d\Omega = 3,49 \times 10^{-27} L^2 \quad (4.24)$$

e, uma vez que  $1 \text{ erg.s}^{-1}.\text{cm}^{-2}.\text{Hz}^{-1} = 10^{-3} \text{ W.m}^{-2}.\text{Hz}^{-1}$ , podemos reescrever a equação (4.23) como

$$S \approx 1,15 \times 10^{-31} L^3 N B \cdot \left[ 10^{-0,52\delta} (\text{sen } \theta)^{-0,43+0,65\delta} n^{1,22-0,9\delta} \right] \quad (4.25)$$

onde S é a densidade de fluxo em UFS (Unidade de Fluxo Solar), tal que

$$1 \text{ UFS} = 10^{-22} \text{ W m}^{-2}.\text{Hz}^{-1}.$$

A equação (4.16) pode ser reescrita como,

$$f_p \approx 2,72 \times 10^{-6} \cdot 10^{0,27\delta} (\text{sen } \theta)^{0,41+0,03\delta} (N.L)^{0,32-0,03\delta} \times B^{0,68+0,03\delta} \quad [\text{GHz}] \quad (4.26)$$

Portanto, com as equações 4.25 e 4.26 podemos estimar a densidade de fluxo em UFS e a frequência de pico em GHz, uma vez tendo disponíveis os valores da dimensão linear da fonte (L) em cm, da densidade dos elétrons emissores (N) em  $\text{cm}^{-3}$ , do campo magnético na região da fonte (B) em Gauss, do ângulo de visada ( $\theta$ ) em graus e do índice espectral da distribuição dos elétrons emissores ( $\delta$ ).

#### 4.3.1.1 - CONSIDERAÇÃO SOBRE O PARÂMETRO $\theta$

De acordo com as fórmulas originais para a emissão *gyrosynchrotron* (Ginzburg e Syrovatskii, 1965; Ramaty, 1969; Takakura, 1971),  $\theta$  é o ângulo entre o vetor *indução magnética* (**B**) na fonte e o vetor de Poynting do sinal recebido. Conforme assumido por Melrose (1980), o vetor **B** é uniforme e faz um ângulo de  $45^\circ$  com a linha do sinal. Portanto, iremos

adotar a mesma consideração, já que os nossos cálculos serão realizados com o objetivo de estimar valores médios.

#### 4.3.1.2 - ESTIMATIVA DO VALOR DE $\delta$

A partir dos valores dos índices espectrais  $\beta$  calculados diretamente dos espectros através da relação 3.1, encontramos que a faixa dos valores de  $\beta$  para explosões impulsivas observadas de 18 a 23 GHz é  $-0,8 > \beta > -4,2$ , com valor médio da distribuição igual a  $\langle \beta \rangle = -2,8$  considerando a relação (4.11) entre  $\beta$  e  $\delta$ , encontramos  $2,2 < \delta < 6,0$ , com valor médio igual a  $\langle \delta \rangle = 4,5$ .

#### 4.3.1.3 - ESTIMATIVA DA DIMENSÃO LINEAR DA FONTE (L)

De acordo com observações em VLA (Kundu 1985), as fontes de microondas apresentam dimensão linear da ordem de segundos de arco. As observações com alta resolução espacial sugerem uma radiofonte com dimensão linear entre 1,5'' e 3'' de arco (para a faixa em torno de 20 GHz). Considerando o disco ativo solar com  $\approx 32'$  encontramos a faixa com  $10^8 \text{ cm} < L < 10^9 \text{ cm}$ .

#### 4.3.1.4 - CONSIDERAÇÕES SOBRE O VALOR DE $f/f_B$ ( $= n$ ) E DE B

A frequência fundamental ( $n=1$ )  $f_B$  em GHz está relacionada com o campo magnético B, em Gauss, através da seguinte expressão

$$f_B = 2,8 \times 10^6 B \quad (4.27)$$

Supondo um campo magnético  $B > 300$  Gauss, teremos uma frequência fundamental  $f_B > 0,84$  GHz (valor inicial característico para microondas).

O limite mínimo para  $n$  é estipulado pelo próprio limite de validade das equações de Dulk e Marsch (1982), ou seja,  $n > 10$ .

O limite máximo é estipulado a partir do valor máximo para a frequência de observação, que é igual a 23 GHz. Nesse caso limite teremos  $n = 23/0,84 = 27,38$ .

Portanto,  $10 < n < 27$ . Na Tabela 4.3 temos os valores para os dois casos extremos,  $n = 10$  e  $n = 27$ .

**TABELA 4.3 - CASOS EXTREMOS PARA O NÚMERO DE HARMÔNICOS**

CASO COM $f_B = 0,84$ GHz		CASO COM $f_B = 1,8$ GHz	
B = 307 Gauss		B = 645 Gauss	
f(GHz)	n	f(GHz)	n
23	27	23	13
22	26	22	12
21	25	21	12
20	24	20	11
19	23	19	11
18	21	18	10

Portanto, considerando um valor inicial para  $n$ , podemos estimar o campo magnético na região por meio da expressão

$$B = 1000 f / (2,8.n) \text{ [Gauss]}, \text{ com } f \text{ em GHz} \quad (4.28)$$

onde, para uma realização iterativa, fixa-se o valor de  $f$  em 18 GHz, variando o valor de  $n$  de 21 a 10, isso garante a aplicação das equações de Dulk/Marsch para a faixa de frequências de 18 a 23 GHz.

#### 4.3.1.5 - ESTIMATIVA DA DENSIDADE DE ELÉTRONS EMISSORES (N)

A fase impulsiva dos *flares* solares é caracterizada pela produção de elétrons energéticos e pelo rápido aquecimento do plasma com distribuição térmica de energia. Holman (1985), mostrou que o tempo de subida da emissão não térmica está relacionado com o tempo necessário para gerar o número total de elétrons "dissidentes" da distribuição térmica, que serão os responsáveis pela emissão impulsiva de microondas e raios-X duros.

De acordo com Holman (1985), a escala temporal  $t_n$  necessária para a produção de  $n$  elétrons, "dissidentes" da distribuição térmica, é expressa pela seguinte relação

$$t_n \geq 165 (n/10^{32})(A/10^{18})^{-1}(B/100)^{-1}(T/10^7)^{1/2}(\nu_e/10)^{-1}\mathcal{F}^{-1} \quad (4.29)$$

onde temos,  $A$  = área da fonte emissora, em  $\text{cm}^2$ ;  $B$  = campo magnético na fonte em Gauss;  $T$  = temperatura do plasma ambiente, em Kelvin;  $\nu_e$  = frequência de colisão da distribuição térmica, em  $\text{s}^{-1}$  e  $\mathcal{F}$  é um parâmetro adimensional dado em função da razão entre a velocidade térmica dos elétrons ( $v_e$ ) e a velocidade crítica ( $v_c$ ), que representa a velocidade a partir da qual os elétrons são acelerados para fora da distribuição térmica.  $\mathcal{F}$  é dado por

$$\mathcal{F} = 4,66 (v_c/v_e)^{11/4} \exp [1,41(v_c/v_e) - 0,25(v_c/v_e)^2] \quad (4.30)$$

No mesmo trabalho Holman mostrou que, para elétrons emissores com energia máxima da ordem de  $10^2$  keV ficamos com a razão  $v_c/v_e \approx 4$ , enquanto que se a energia máxima é da ordem de  $10^4$  keV ficamos com a razão  $v_c/v_e \approx 6$ .

Como foi visto na seção 4.1 desta dissertação, nossas energias máximas se apresentaram entre 82 e 275 keV. Por isso, consideraremos para este estudo a razão  $v_c/v_e \approx 4$ , obtendo assim um valor para  $\mathcal{F}$  igual a  $1,12 \times 10^3$ .

Considerando o valor de  $\mathcal{F}$  e reescrevendo a equação 4.29 em termos da densidade  $n$ , ficamos com uma expressão que nos permite estimar o número total de elétrons emissores, tal que

$$n \leq 6,79 \times 10^{32} t_n (A/10^{18}) (B/100) (T/10^7)^{-1/2} (\nu_e/10) \quad (4.31)$$

#### 4.3.1.6 - CONSIDERAÇÃO SOBRE O VALOR DE T

De acordo com Holman (1985) e Dulk (1985), a temperatura do plasma ambiente para a região onde poderá surgir uma população não-térmica de elétrons emissores de microondas, se situa na faixa entre  $10^6$  a  $10^7$  K.

#### 4.3.1.7 - ESTIMATIVA DO PARÂMETRO $\nu_e$

Uma aproximação para a frequência de colisão  $\nu_e$  dos elétrons candidatos a tornar-se não-térmicos é dada em (Kundu, 1985)

$$\nu_e \approx 300 N_e T^{-3/2} \quad (\text{s}^{-1}) \quad (4.32)$$

onde  $N_e$  é a densidade do plasma ambiente em  $\text{cm}^{-3}$ .

A partir da relação entre o campo magnético na fotosfera e o campo magnético na região emissora, que está numa altura  $h$  em relação a fotosfera (Kundu, 1965), obtivemos a seguinte expressão

$$h = 10^3 \cdot L \cdot [ (B^2 - 2BB_0 + 2B_0^2) / (2BB_0 - B^2 - 2B_0^2) ]^{1/2} \quad (4.33)$$

onde  $B_0$  é o campo magnético na fotosfera, geralmente associado às manchas solares (por isso podem ser obtidos diretamente do Solar Geophysical Data).

Considerando finalmente o modelo de densidade de Cilliè-Menzel (1930), podemos estimar o valor de  $N_e$  por meio da seguinte expressão

$$N_e = 5 \cdot 10^{11} \exp [-7,7 \cdot 10^{-4}(h-500)] \quad [\text{cm}^{-3}] \quad (4.34)$$

Portanto, assumindo um valor para a temperatura  $T$ , poderemos utilizar as expressões 4.33, 4.34 e 4.32 para a estimativa de  $\nu_e$ .

Estimado o valor da frequência de colisão  $\nu_e$ , por meio da equação 4.32, podemos estimar, através da equação 4.31, o número total de elétrons emissores  $n$ . Considerando o volume da fonte  $\approx L^3$  teremos então uma aproximação para a estimativa da densidade de elétrons emissores  $N$ , tal que

$$N < n L^{-3} \quad (4.35)$$

O Fluxograma 4.1, para a estimativa de  $f_p$ , nos permite avaliar as curvas espectrais obtidas a partir das nossas frequências (18-23 GHz) em conjunto com outros valores publicados no SGD (como a curva da Figura 3.3), além de proceder uma primeira estimativa dos parâmetros B e N associados à fonte de emissão. No fluxograma da Figura 4.1,  $f_p$  é estimada em GHz, tendo como *input* f em GHz, L em cm, B<sub>0</sub> em Gauss, θ em graus, T em graus Kelvin e  $t_n$  em segundos.

O fluxograma da Figura 4.2, para a estimativa de S, nos permite obter curvas espectrais semiquantitativas e compará-las com os espectros observados, avaliando assim a validade do modelo descrito pelas equações de Dulk e Marsch (1982). Neste fluxograma S é estimada em UFS, tendo como *input* k = 1 e f, B, N, L e θ nas mesmas unidades do *input* para o fluxograma 4.1.

#### 4.3.2 - CAMPO ELÉTRICO ACELERADOR DOS ELÉTRONS EMISSORES

Do trabalho de Holman (1985), também podemos estimar um outro parâmetro importante: o campo elétrico acelerador responsável pela "fuga" de n elétrons da distribuição térmica (E). Esse campo irá acelerar os elétrons a partir da velocidade crítica  $v_c$  até a velocidade v (relacionada com a energia máxima adquirida pelos elétrons acelerados). Considerando o caso de elétrons levemente relativísticos, escrevemos a expressão 15 do artigo de Holman (1985), para o campo elétrico, como

$$E = m e^{-1} (\gamma v - v_c) (v_e/v_c)^2 [(\gamma v/v_e) - (v_c/v_e)]^{-1} \nu_e \quad (4.36)$$

onde m e e são a massa e carga do elétron, respectivamente;  $\gamma$  é o fator de Lorentz;  $\nu_e$  a frequência de colisão para a distribuição térmica,  $v_e$  é a velocidade térmica dos elétrons, tal que

$$v_e = 3,86 \times 10^4 (T)^{1/2} \quad [\text{cm/s}] \quad (4.37)$$

As considerações sobre a relação  $v_c/v_e$  (discutidas na pg. 73) sobre a estimativa de  $v_e$  continuam válidas para esse cálculo. A velocidade  $v$  relacionada com a energia máxima dos elétrons emissores pode ser estimada a partir da energia máxima observada no espectro da explosão solar em raios-X duros, interpretada como uma aproximação da energia cinética ( $m_0 c^2 [\gamma - 1]$ ) dos elétrons emissores, tal que,

$$v \approx 3 \times 10^{10} (1 - (\mathcal{E}^2 [\text{keV}] / 2,6 \times 10^5)^{-1/2}) \quad [\text{cm/s}] \quad (4.38)$$

O fluxograma da Figura 4.3 nos permite a estimativa do campo elétrico  $E$  em statvolt/cm, tendo como *input*  $\mathcal{E}$  em keV,  $T$  em Kelvin e  $v_e$  em  $\text{s}^{-1}$ .

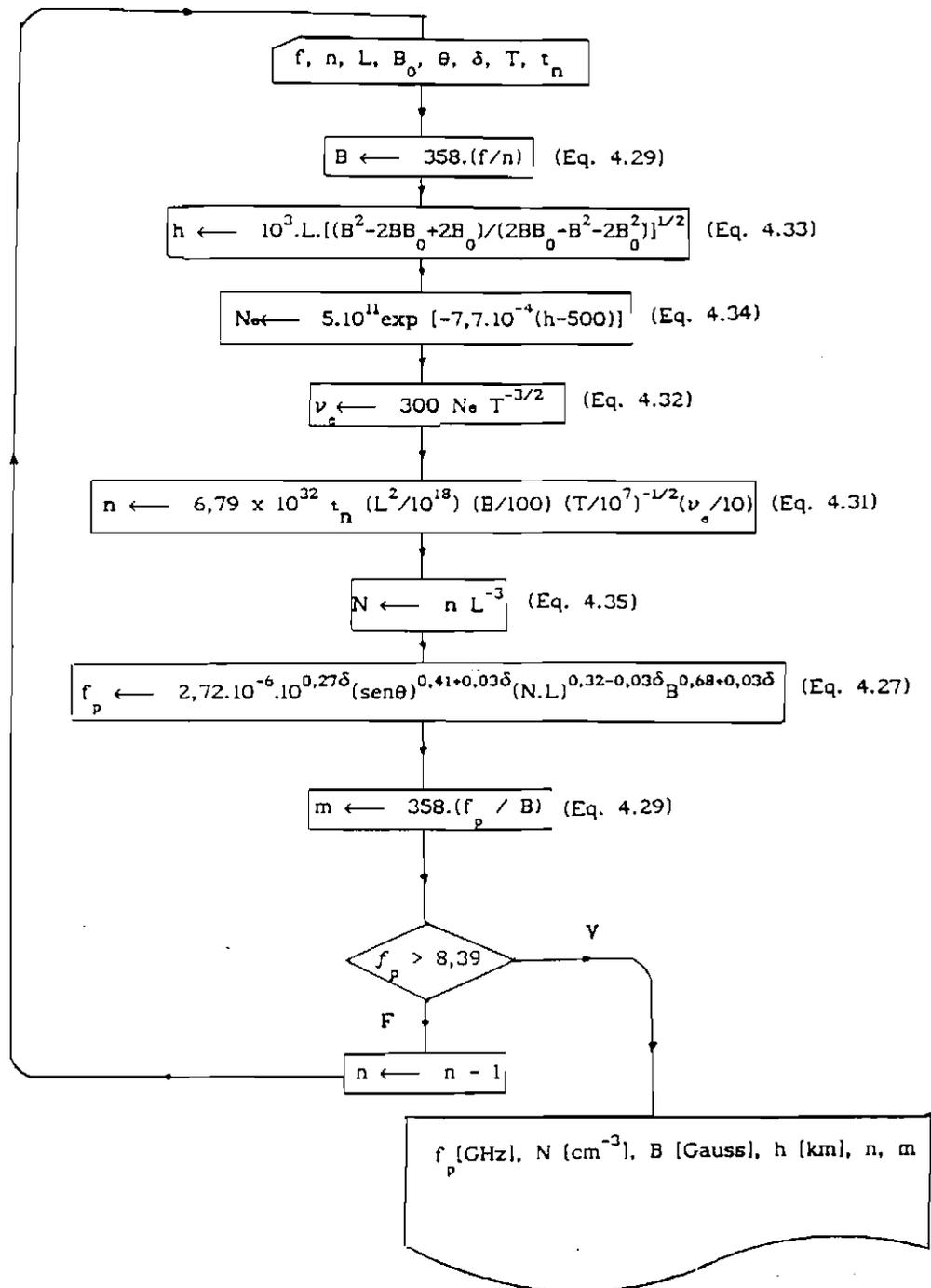


Fig. 4.1 - Fluxograma para a estimativa da frequência de pico ( $f_p$ ), com as expressões numeradas como aparecem no texto.

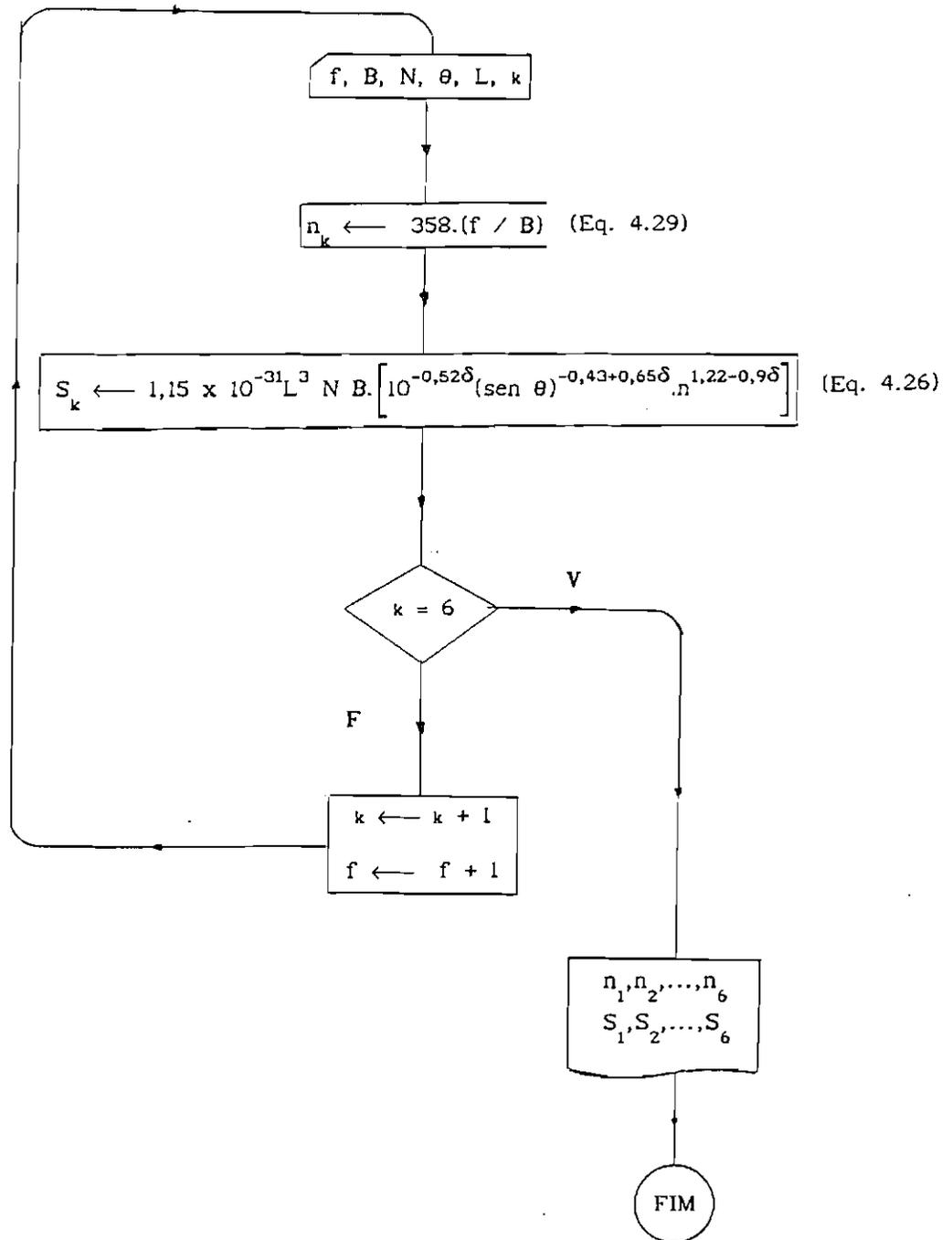


Fig. 4.2 - Fluxograma para a estimativa da densidade de fluxo ( $S$ ) em Unidades de Fluxo solar, com as expressões como aparecem no texto.

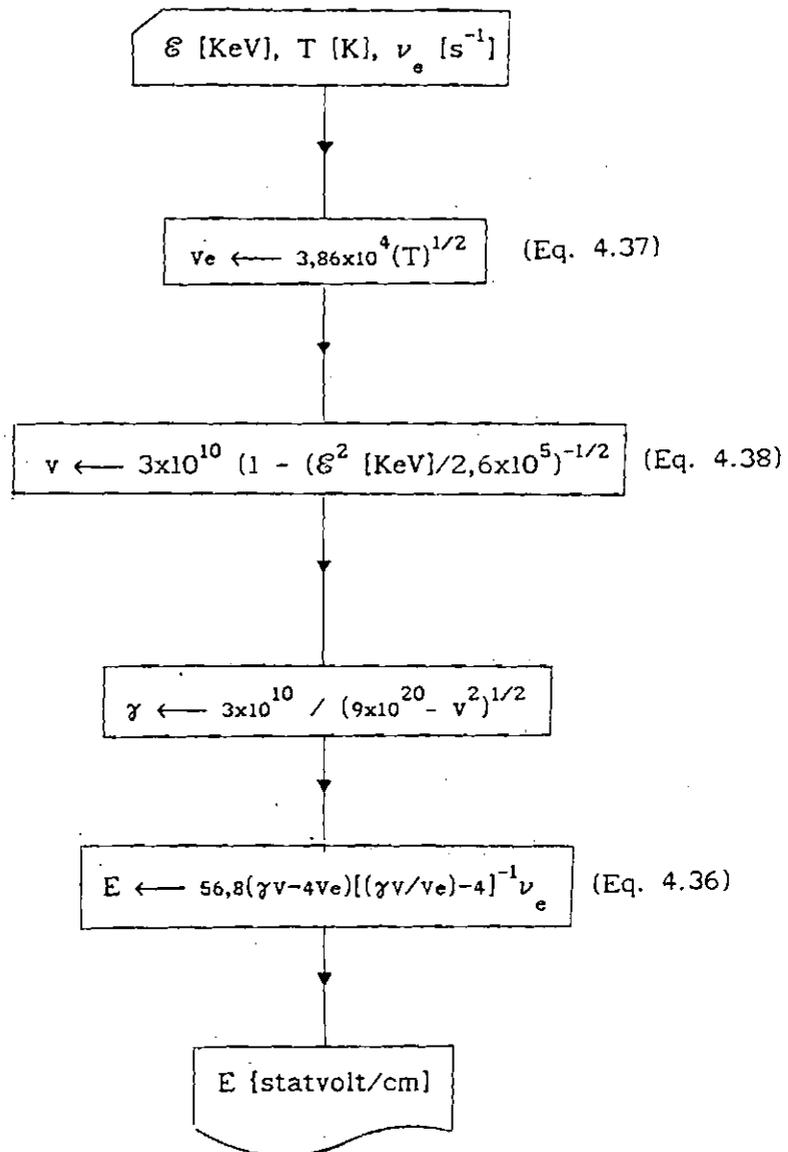


Fig. 4.3 - Fluxograma para a estimativa do campo elétrico E, em statvolt/cm, com as expressões numeradas como aparecem no texto.

### 4.3.3 - ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS ASSOCIADOS À FONTE E AO ESPECTRO DA EMISSÃO

O conjunto de valores de entrada para o Fluxograma da Figura 4.1 é:

- 1)  $f = 18 \text{ GHz}$  *(observado)*
- 2)  $n = 21$  *(assumido)*
- 3)  $B_0 = 2800 \text{ Gauss}$  *(observado)*
- 4)  $T = 5 \times 10^6 \text{ K}$  *(assumido)*
- 5)  $L = 5 \times 10^8 \text{ cm}$  *(assumido)*
- 6)  $t_n = 5 \text{ s}$  *(observado)*
- 7)  $\delta = 4,5$  *(observado)*
- 8)  $\theta = 45^\circ$  *(assumido)*

O conjunto de valores de saída para o Fluxograma da Figura 4.1 é:

- 1)  $B = 307 \text{ Gauss}$
- 2)  $h = 2433 \text{ km}$
- 3)  $\nu_e \approx 3000 \text{ colisões/s}$
- 4)  $n \leq 1,11 \times 10^{36} \text{ elétrons}$
- 5)  $N \leq 8,84 \times 10^9 \text{ elétrons/cm}^3$
- 6)  $f_p \leq 11 \text{ GHz}$
- 7)  $m = 13$

O conjunto de valores de entrada para o Fluxograma 4.2 é

- 1)  $f = 18 \text{ GHz}$
- 2)  $B = 307 \text{ Gauss}$
- 3)  $N = 8,84 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$
- 4)  $L = 5,00 \times 10^8 \text{ cm}$
- 5)  $\theta = 45^\circ$
- 6)  $k = 1$
- 7)  $\delta = 4,5$

O conjunto de valores de saída para o Fluxograma da Figura 4.2, após 6 iterações, é:

- 1)  $S_1 = 13,50$  UFS (18 GHz)  
 $n_1 = 21$
- 2)  $S_2 = 11,60$  UFS (19 GHz)  
 $n_2 = 22$
- 3)  $S_3 = 10,04$  UFS (20 GHz)  
 $n_3 = 23$
- 4)  $S_4 = 8,75$  UFS (21 GHz)  
 $n_4 = 24$
- 5)  $S_5 = 7,67$  UFS (22 GHz)  
 $n_5 = 26$
- 6)  $S_6 = 6,76$  UFS (23 GHz)  
 $n_6 = 27$

O conjunto de valores de entrada para o Fluxograma da Figura 4.3 é:

- 1) CASO A  
 $\mathcal{E} = 82,00$  keV  
 $T = 5,00 \times 10^6$  K  
 $\nu_e = 1,15 \times 10^3$  s<sup>-1</sup>
- 2) CASO B  
 $\mathcal{E} = 275,00$  keV  
 $T = 5,00 \times 10^6$  K  
 $\nu_e = 1,15 \times 10^3$  s<sup>-1</sup>

Os valores na saída do Fluxograma 4.3, para o campo elétrico acelerador dos elétrons emissores, estão na seguinte faixa:

$$56,7 \times 10^{-3} \leq E \leq 58,1 \times 10^{-3} \text{ statvolt/cm}$$



## CAPÍTULO 5

## DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

## 5.1 - INTERPRETAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS ESPECTRAIS OBSERVADAS

5.1.1 - FREQUÊNCIA DE PICO ( $f_p$ )

Stahli et al. (1989) apresentaram estudos sobre 49 explosões solares observadas em 1981 na faixa de 1 a 18 GHz. Onze dessas explosões foram consideradas de baixa intensidade, apresentando  $S_{max} < 100$  UFS, tempo de subida  $< 1$  minuto e estando todas associadas a *flares* solares com importância óptica SN ou SF (ver Apêndice A). Os espectros construídos com as densidades de fluxo  $S_{max}$ , para essas explosões de baixa intensidade na faixa de 1 a 18 GHz, foram interpretados como resultantes de mecanismo de emissão *gyrosynchrotron* com frequências de pico entre 7 e 11 GHz.

Observamos 16 explosões impulsivas de baixa intensidade apresentando  $S_{max} < 100$  UFS, tempo de subida da ordem de segundos e associadas com *flares* em H $\alpha$  com importância óptica SN ou SF (ver Apêndice A). Para sete dessas explosões foi possível construir o espectro incluindo densidades de fluxo observadas em outras frequências, como discutido na Seção 3.1 (ver Fig. 3.3). Esses espectros foram interpretados como resultantes de emissão *gyrosynchrotron* com frequência de pico entre 7 e 15 GHz.

Através dos histogramas da Figura 5.1 notamos que as faixas de valores para a frequência de pico ( $f_p$ ) das explosões observadas de 1 a 18 GHz e 18 a 23 GHz apresentaram boa concordância. Isso caracterizou uma faixa de valores (7 a 11 GHz) para a  $f_p$  dos espectros das explosões solares impulsivas, de baixa intensidade, resultantes de emissão *gyrosynchrotron*.

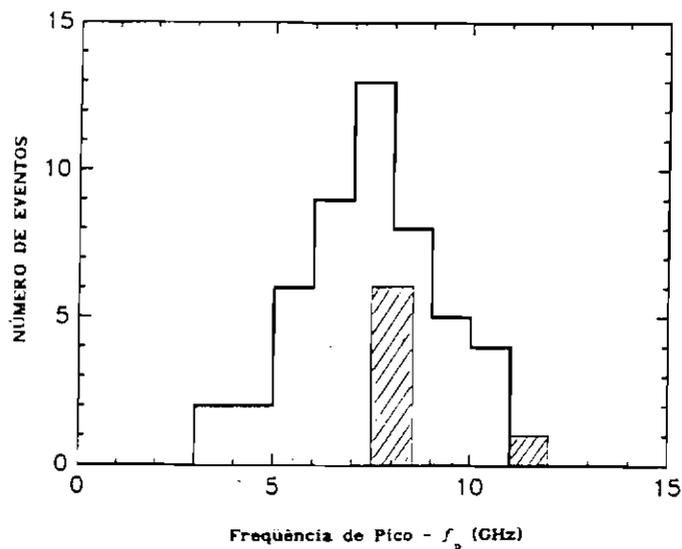


Fig. 5.1 - Histograma para as frequências de pico observadas por Stahli et al (1989) (curva não hachurada) e histograma para as frequências de pico inferidas a partir das explosões observadas na faixa de 18 a 23 GHz (curva hachurada).

### 5.1.2 ÍNDICE ESPECTRAL ( $\beta$ )

Os índices espectrais ( $\beta$ ) calculados a partir da faixa espectral de 18 a 23 GHz (ver Figura 3.4) apresentaram valores entre -1,0 e -4,0, com valor médio igual a -2,8. Esses valores para  $\beta$ , nos permitiu obter, por meio da relação 4.11, um valor médio para o índice espectral da distribuição de energia dos elétrons emissores ( $\delta$ ) igual a 4,5. De acordo com Dulk e Marsch (1982) e Dulk (1985) a emissão térmica ópticamente fina prevê um valor de  $\delta$  elevado ( $\approx 8$ ), indicando portanto que o valor de 4,5, obtido a partir dos espectros observados na faixa de 18 a 23 GHz, sugere que o mecanismo de emissão para essas explosões seja não-térmico.

### 5.1.3 - ESTRUTURAS FINAS

As estruturas finas em vários dos espectros por nós observados (e confirmadas através dos espectros em UV e RF - 1 a 18 GHz) geralmente são interpretadas como resultado de uma temperatura não-homogênea devido a presença de um patamar no perfil de temperatura cromosférica, como proposto teoricamente por Athay (1985). Ou ainda, como resultante de efeitos de

superposição devido à emissão de duas fontes: uma emitindo em banda estreita e a outra emitindo em banda larga (Stahli et al, 1989). Uma outra hipótese, considerando um excesso de emissão proveniente de uma linha *ciclotron*, é aqui descartada pois requer um campo magnético da ordem de  $10^4$  Gauss para uma altura da ordem de 2000 km (Sawant e Cecatto, 1990; Cecatto, 1991).

## 5.2 - INTERPRETAÇÃO DO ESPECTRO CALCULADO

O valor estimado para a frequência de pico, através do Fluxograma 4.1, ( $f_p < 11$  GHz), concorda tanto com a faixa de valores obtida através dos espectros observados (incluindo a faixa de 18 a 23 GHz), como com a faixa de valores dos espectros observados por Stahli et al (1989), como pode ser notado nas distribuições da Figura 5.1. Esse acordo fortalece indiretamente os valores estimados para os parâmetros  $h$ ,  $B$ ,  $v_e$  e  $N$  da fonte, também calculados a partir do Fluxograma 4.1.

Através do Fluxograma 4.2 calculamos as densidades de fluxo máximas para as frequências de 18 a 23 GHz, obtendo dessa forma o espectro semiquantitativo representativo das explosões impulsivas do tipo simples na faixa de 18 a 23 GHz (Figura 5.2). Esse espectro fornece um valor para índice  $\beta = -2,62$ , que por meio da relação 4.11 (entre  $\beta$  e  $\delta$ ) nos fornece um valor para o índice  $\delta = -4,3$ . Os valores estimados a partir do espectro observado são,  $\beta = -2,8$  e  $\delta = 4,5$ .

Com o objetivo de interpretar a consistência entre o espectro calculado e o espectro observado, introduzimos um campo espectral com três faixas de consistência (ver Figura 5.3). A faixa de *alta consistência* foi definida pelo *erro da média* dos valores da densidade de fluxo observada para cada frequência (18 a 23 GHz). A faixa de *média consistência* foi definida pelo *desvio padrão* para os mesmos valores médios mencionados acima. A faixa de *baixa consistência* foi definida através dos contornos desse campo, considerados a partir dos valores máximos e mínimos para a densidade de fluxo observada nas frequências de 18 e 23 GHz. As faixas superior e inferior desse campo, que estão além da faixa de baixa consistência, foram consideradas como regiões *sem consistência* entre o espectro calculado e o espectro representativo das observações.

O espectro calculado encontra-se numa região, do campo espectral, de média consistência, sugerindo que os Fluxogramas 4.1 e 4.2 podem ser aplicados com média confiabilidade. Teremos esses resultados tendendo à faixa de alta consistência conforme os valores, para os parâmetros L e T no *input*, forem sendo de maior confiabilidade, ou seja, mais próximos dos valores reais.

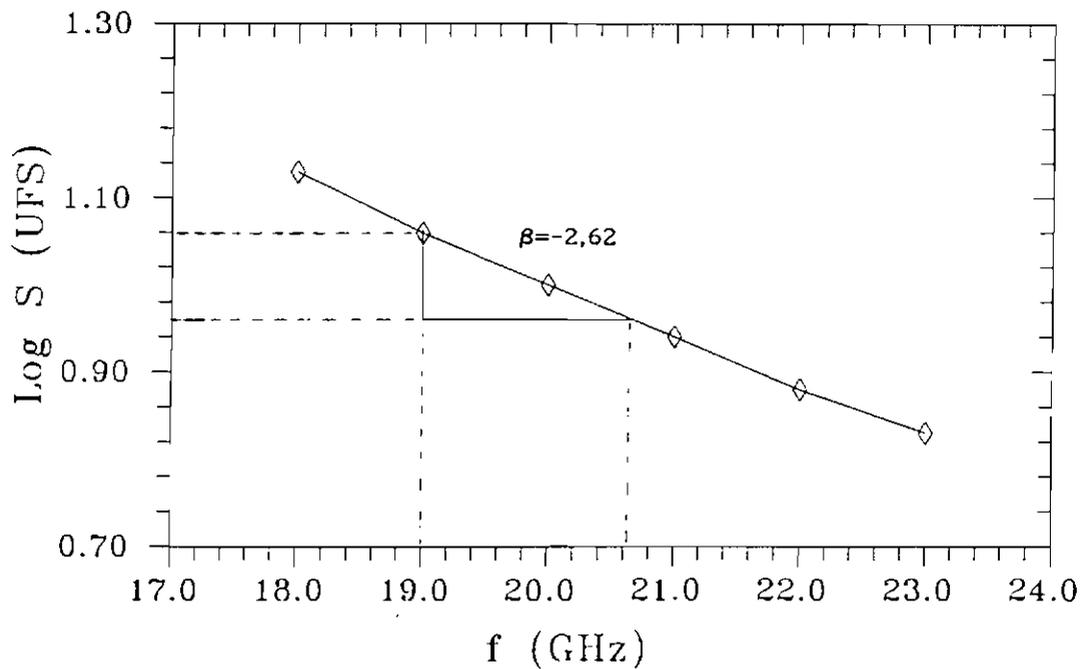


Fig. 5.2 - Espectro calculado a partir do Fluxograma 4.2.

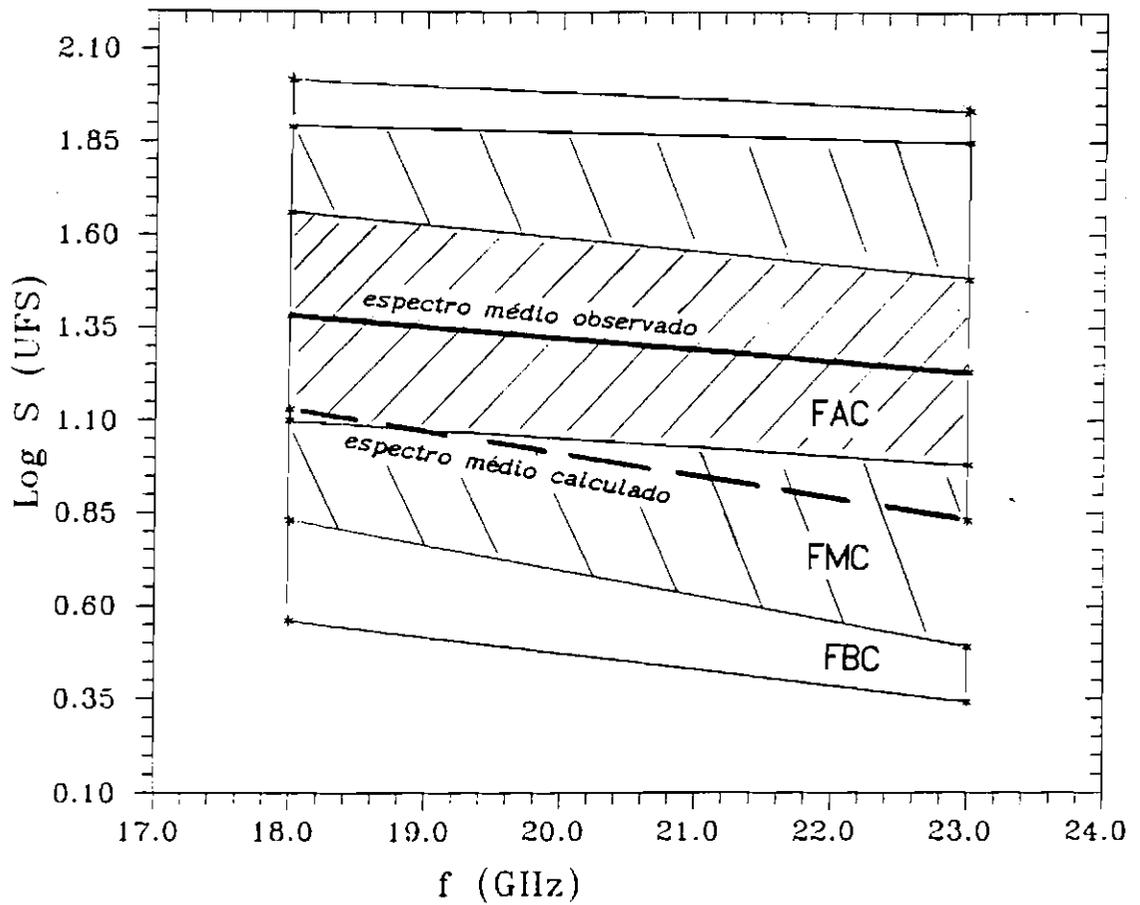


Fig. 5.3 - Campo espectral destacando as faixas de consistência entre os espectros médios calculado e observado. Onde as siglas FAC, FMC e FBC representam, respectivamente, a faixa de alta consistência (hachurado mais estreito), a de média consistência (hachurado mais largo) e a de baixa consistência (não hachurada).

### 5.3 - DISCUSSÕES SOBRE OS VALORES ESTIMADOS PARA A FONTE DE EMISSÃO

Os valores estimados, através do Fluxograma da Figura 4.1, para: (1) a altura mínima em que a fonte de microondas se encontra em relação à fotosfera -  $h = 2,4 \times 10^3$  km; (2) a intensidade do campo magnético local -  $B = 307$  Gauss; (3) a frequência de colisão do plasma ambiente -  $\nu = 3,0 \times 10^3$  s<sup>-1</sup>; (4) densidade de elétrons emissores -  $N \leq 8,8 \times 10^9$  cm<sup>-3</sup>, estão de acordo com alguns valores típicos também investigados para a parte de altas frequências do espectro de microondas, considerando uma fonte homogênea de elétrons não-térmicos (ver Tabela 5.1).

De acordo com os resultados apresentados por Dulk e Dennis (1982), Holman (1985) e Kosugi et al (1988), a densidade de elétrons não-térmicos, da fonte de emissão de microondas e raios-X duros, encontra-se na faixa de  $8,0 \times 10^8 \leq N \leq 5,0 \times 10^9$  cm<sup>-3</sup>, com um campo magnético local de  $\approx 300$  Gauss. O valor estimado pelos nossos cálculos ( $N \leq 8,8 \times 10^9$  cm<sup>-3</sup>) eleva o limite superior da faixa mencionada anteriormente. Por outro lado, o limite superior por nós calculado sugere que o valor assumido para a dimensão linear da fonte de microondas ( $L \approx 5 \times 10^8$  cm) pode ser ligeiramente superior ( $L \geq 6,0 \times 10^8$  cm), ajustando dessa forma o valor de  $N$  para dentro daquela faixa ( $N \leq 5 \times 10^9$  cm<sup>-3</sup>).

A boa concordância entre as faixas de valores estimada e esperada para a densidade dos elétrons emissores, mostrou que a relação entre a escala temporal de geração dos elétrons emissores ( $t_n$ ) e o tempo de subida da explosão ( $t_s$ ) são coincidentes, de acordo com o processo de aceleração teóricamente sugerido por Holman (1985).

Os cálculos desenvolvidos por meio do Fluxograma da Figura 4.3 forneceram uma faixa, para a intensidade do campo elétrico acelerador dos elétrons emissores, igual a:  $5,7 \times 10^{-2} \leq E \leq 5,8 \times 10^{-2}$  statvolt/cm. Kundu (1985) estimou a intensidade de  $E$  para a frequência de 5 GHz encontrando a seguinte faixa:  $0,2 \times 10^{-6} \leq E \leq 4 \times 10^{-6}$  statvolt/cm. Entretanto, essa faixa não é adequada para uma interpretação comparativa uma vez que corresponde à parte opticamente espessa do espectro de microondas, para a qual Kundu considerou  $v_c/v_e \approx 2$  (valor característico para uma distribuição térmica de elétrons emissores).

TABELA 5.1 - VALORES MÉDIOS PREVIAMENTE ESTIMADOS  
E ESTIMADOS NESSE TRABALHO PARA OS PARÂMETROS ASSOCIADOS COM  
AS EXPLOSÕES IMPULSIVAS DO TIPO SIMPLES NA FAIXA DE 18 A 23 GHz

PARÂMETRO	VALOR AQUI ESTIMADO	VALOR ESTIMADO ANTERIORMENTE
h (km)	$2,4 \times 10^3$	$\approx 10^3$ (Pizzo, 1986; Vlahos, 1986)
B (Gauss)	307	200 a 1000 (Dulk e Dennis, 1982; Gary, 1985; Kai, 1986; Pizzo, 1986)
$\nu_e$ ( $s^{-1}$ )	$3,0 \times 10^3$	$\approx 10^3$ (Holman, 1985)
N ( $cm^{-3}$ )	$\leq 8,8 \times 10^9$	$8,0 \times 10^8$ a $5,0 \times 10^9$ (Dulk e Dennis, 1982; Holman, 1985; Kosugi et al, 1988)
E (statv/cm)	$\approx 0,06$	Não encontrado

Um possível cenário para a explosão solar impulsiva na faixa de 18 a 23 GHz, considerando uma fonte homogênea de elétrons não-térmicos, pode ser visto na Figura 5.4.

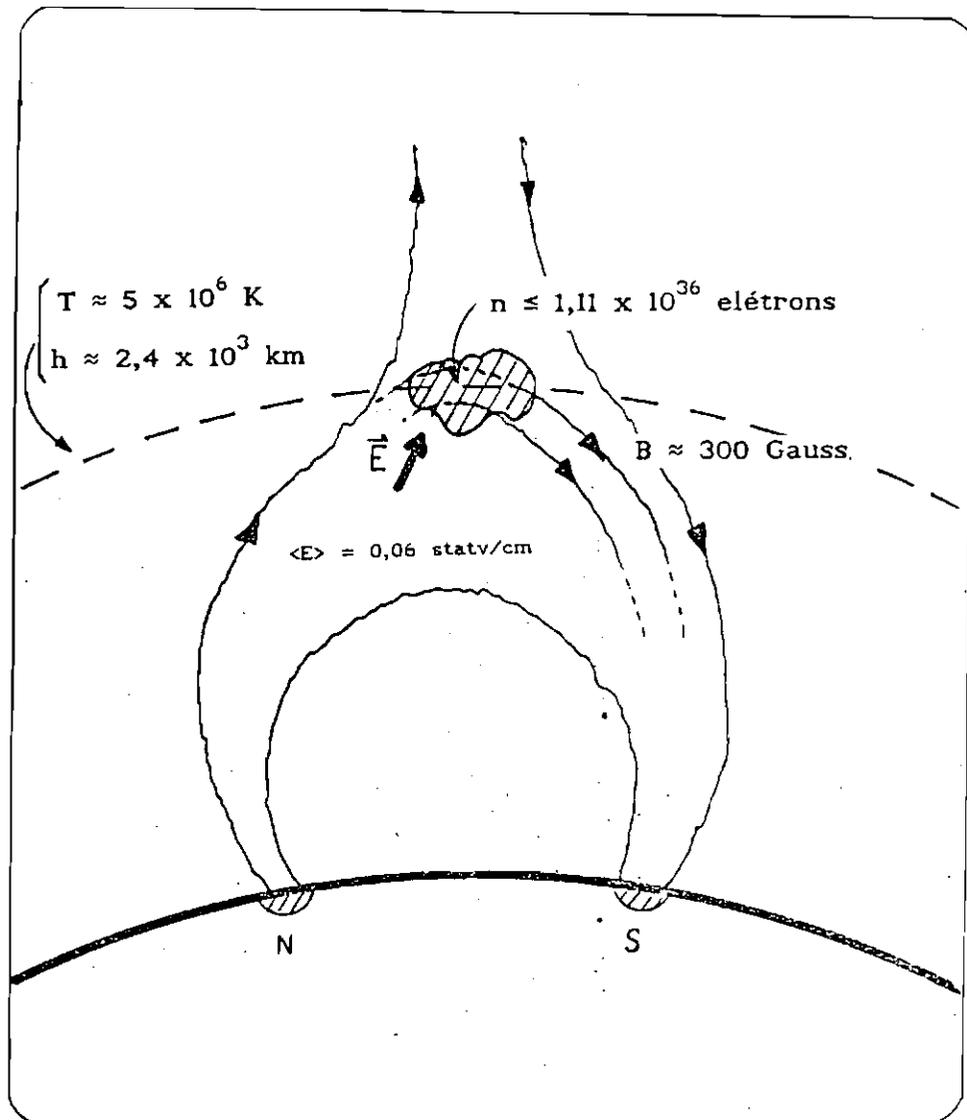


Fig. 5.4 - Possível cenário para a explosão solar impulsiva na faixa de 18 a 23 GHz, considerando uma fonte homogênea de elétrons não-térmicos

#### 5.4 - CONCLUSÕES

1) Das 23 explosões impulsivas selecionadas, 16 são do tipo simples ( $\approx 70\%$  da amostra), com  $S_{\max}$  médio igual a 10 UFS e tempo de subida entre 1 e 6 segundos, apresentando correlação com *flares* em H $\alpha$  do tipo SF e SN. Isto sugere que as explosões solares impulsivas do tipo simples, observadas na faixa de 18 a 23 GHz, podem estar associadas com os *Elementary Flare Bursts*, discutidos no Capítulo 3.

2) A forma dos espectros obtidos, incluindo a faixa de 18 a 23 GHz, sugere que a emissão resulta de mecanismo *gyrosynchrotron*.

3) O índice espectral  $\beta$  dos rádio-espectros (18 a 23 GHz) apresenta valores de -1 a -4, e a sua evolução temporal (em valor absoluto) mostra que diminui entre o início e o pico da explosão e aumenta entre o pico e o final da explosão indicando que: i) o processo de emissão é não-térmico durante a fase de subida da explosão; ii) o processo de *geração/aceleração* dos elétrons emissores é do tipo *impulsivo* para 63 % dos eventos.

4) A faixa de energia máxima dos elétrons não térmicos responsáveis pela emissão, com base nas explosões correlacionadas com raios-X duros, é de 82 a 275 keV.

5) O espectro médio calculado (*gyrosynchrotron não-térmico*) para a faixa de 18 a 23 GHz, concorda em  $\approx 70\%$  com o espectro médio observado nessa faixa.

6) A frequência de pico ( $f_p$ ), para o espectro médio calculado para a faixa de 18 a 23 GHz, foi estimada entre 8,4 e 11 GHz, com número de harmônicos igual a 10 e 13 respectivamente, concordando com os valores de  $f_p$  observados.

7) Considerando que a fonte responsável pela emissão impulsiva do tipo simples na faixa de 18 a 23 GHz possui uma dimensão linear entre  $10^8$  e  $10^9$  cm, estimamos a sua densidade de elétrons  $\leq 8,8 \times 10^9$  cm $^{-3}$ , estando situada numa região a  $\approx 2400$  km da fotosfera com campo magnético da ordem de 300 Gauss.

## 5.5 - SUGESTÕES E TRABALHOS FUTUROS

### 5.5.1 - TRATAMENTO INDIVIDUALIZADO DAS EXPLOSÕES IMPULSIVAS DO TIPO SIMPLES

O tratamento semiquantitativo resumido através dos Fluxogramas das Figuras 4.1, 4.2 e 4.3, deve ser aplicado para cada uma das explosões, ou seja, devemos considerar como parâmetros de *input* os valores correspondentes à uma explosão individual, e não os valores médios obtidos a partir de um conjunto de explosões. Porém, esse tratamento individualizado depende de valores mais precisos para os parâmetros  $L$ ,  $B$  e  $\theta$  (provavelmente obtidos a partir do aprimoramento da resolução espacial dos instrumentos atuais disponíveis no mundo).

### 5.5.2 - ESTUDO DOS MECANISMOS DE EMISSÃO DAS EXPLOSÕES DO TIPO PECULIAR

Nas explosões do tipo peculiar (de acordo com os tipos introduzidos na seção 3.2) podemos investigar a superposição de dois eventos gerados por populações diferentes de elétrons. Sugere-se que a componente gradual da explosão seja resultante de uma população térmica de elétrons. Nesse sentido, as equações de Dulk e Marsch para mecanismo de emissão *gyrosynchrotron* térmico podem ser utilizadas para investigar esse tipo de evento, complementando o estudo das explosões solares observadas na faixa de 18 a 23 GHz.

### 5.5.3 - ESTUDO MAIS CRITERIOSO DOS ESPECTROS COM ESTRUTURAS FINAS EM FREQUÊNCIA

Um estudo mais criterioso dos espectros com estruturas finas, será feito a partir do momento que obtivermos um número maior desses espectros cujas estruturas finas sejam confirmadas por meio da variação do índice espectral em outras frequências. Este estudo poderá permitir interpretar as explosões do tipo complexo como uma superposição de explosões do tipo simples.

#### 5.5.4 - ESTUDOS CORRELATIVOS ENTRE MICROONDAS E RAIOS-X DUROS

Quando disponível um número maior de explosões correlacionadas (microondas na faixa de 18 a 23 GHz com raios-X duros) iniciaremos uma série de estudos correlativos. Este tipo de estudo foi iniciado por Kai (1986) e posteriormente foi também desenvolvido por Kosugi et al (1988), considerando apenas uma única frequência (17 GHz). Nos nossos estudos, tentaremos investigar a correlação entre os fluxos considerando o espectro de microondas e não apenas uma única frequência (Sawant et al, 1992). Propomos ainda a análise da razão entre o ruído do sinal e o ruído dos detectores de raios-X a fim de investigar se o decréscimo do coeficiente de correlação com a energia (Kosugi et al, 1988) é ou não devido a um decaimento real do sinal.

Com a realização desses estudos correlativos poderemos testar futuros modelos para a fonte da emissão de microondas (18 a 23 GHz) e raios-X duros ( $\mathcal{E} > 20$  keV).

#### 5.5.5 - ESTUDO DO NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA E CAOTICIDADE DO SINAL

É possível estabelecer *funções de autocorrelação* a partir dos perfis temporais das explosões, a fim de investigar a natureza do ruído (que geralmente se elimina) estabelecendo uma *faixa de influencia intersimbólica* para o sinal. Esse estudo é possível desde que os dados surjam na forma de registros que permitam uma codificação, como é o caso dos sinais astrofísicos (Vieira, 1980). Conjuntamente, o tratamento do sinal através da *Teoria dos Sistemas Dinâmicos*, permitirá investigar se as flutuações no sinal são devido a processos estocásticos ou são exemplos de caos *determinístico*. Desde que o *espaço de fases* possa ser construído a partir de medidas de uma variável (densidade de fluxo, por exemplo) e parâmetros invariantes obtidos a partir de uma série temporal (duração dos eventos), será possível demonstrar que o caos existe contribuindo para a modelagem do sistema. Além da determinação dos parâmetros típicos do sistema dinâmico (*dimensão fractal* e *os expoentes de Lyapunov*) é possível estimar a chamada *Entropia de Kolmogorov*, que fornece uma medida complementar que descreve a taxa (bits por iteração) com a qual o sistema perde informação (Romanelli et al, 1987).

#### 5.5.6 - SUGESTÕES PARA O RADIÔMETRO MILIMÉTRICO (18-23 GHz)

A fim de promover medidas que possam fornecer informações sobre a polarização circular do sinal recebido, se faz necessária a utilização de mais uma corneta operando com polarização linear vertical na banda K.

A fim de melhorar a resolução temporal do sistema (50 ms), se faz necessário o uso de um oscilador local (YIG Tuned Oscillator) com melhor resolução temporal e com menor tempo de permanência por frequência.

A fim de conhecer melhor o comportamento do índice espectral, sugerimos que o sistema opere no *modo de chaveamento* entre a faixa atual de frequências (18-23 GHz) e 44 GHz.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Athay, R.G. The chromosphere and transition region: current status and future directions of models. *Solar Physics*, 100(1):257-279, June 1985.
- Cecatto, J.R. Estrutura fina superposta em espectros de região ativa solar em comprimentos de onda milimétricos (23-18 GHz). (Dissertação de Mestrado em Ciência Espacial / Radioastronomia e Física Solar) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1991. 109 p. (INPE-5371-TDI/470).
- Cillié, G.C.; Menzel, D.H. The physical state of the solar chromosphere. *Harvard College Observatory Circular*, 410(1):1-40, Oct. 1935. Apud Kundu, 1965.
- Cliver, E.W.; Dennis, B.R.; Kiplinger, A.L.; Kane, S.R.; Neidig, D.F.; Sheeley, N.R.; Koomen, M.J. Solar gradual hard X-ray bursts and associated phenomena. *Astrophys. J.*, 305(1):920-935, June 1986.
- Crannell, C.J.; Dulk, G.A.; Kosugi, T.; Magun, A. Observations and interpretation of solar flares at microwave frequencies. *Solar Physics*, 118(1):155-183, May 1988.
- Dennis, B.R.; Orwig, L.E.; Kiplinger, A.L.; Gibson, B.R.; Kennard, G.S.; Tolbert, A.K. NASA TM - 86236 **Hard X-ray burst spectrometer**. Washington, DC, NASA, 1985.
- Dulk, G.A.; Dennis, B.R. Microwaves and hard X-rays from solar flares: multithermal and nonthermal interpretations. *Astrophys J.*, 260(1):875-884, Sep 1982.
- Dulk, G.A.; Marsch, K. Simplified expressions for the gyrosynchrotron radiation from mildly relativistic, nonthermal and thermal electrons. *Astrophys. J.*, 259(2):350-358, Aug 1982.

- Dulk, G.A. Radio emission from the sun and stars. *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 23(1):169-224, 1985.
- Gary, D.E. The numbers of fast electrons in solar flares as deduced from hard X-ray and microwave spectral data. *Astrophys. J.*, 279(2):799-804, Oct. 1985.
- Ginzburg, V.L; Syrovatskii, S.I. Cosmic magnetobremstrahlung (synchrotron radiation). *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 3(1):297-350, 1965.
- Guidice, D.; Castelli, J. Spectral distributions of microwave bursts, *Solar Physics*, 44(1):155-172, May 1975.
- Holman, G.D. Acceleration of runaway electrons and joule heating in solar flares. *Astrophys. J.*, 293(1):584-594, June 1985.
- Holt, S.H.; Ramaty, R. Microwave and hard X-ray bursts from solar flares. *Solar Physics*, 8(1):119-141, Nov. 1969.
- Hurford, G.J. Solar microwave spectroscopy. In: INDU-US Workshop Solar Terrestrial Physics, New Delhi, India, 1984. *Proceedings of the INDU-US.* Oxford, Pergamon, 1984, p. 259-263.
- Hurford, G.J.; Read, R.B.; Zirin, H. Solar microwave spectroscopy. *Solar Physics*, 94(1):413-417, June 1985.
- Kai, K.; Kosugi, T.; Nitta, N. Flux relations between hard X-rays and microwaves for both impulsive and extended solar flares. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 37(1):155-162, Nov. 1985.
- Kai, K. Can observed hard X-ray and microwave flux from solar flares be explained by a single electron population? *Solar Physics*, 104(1):235-241, Mar. 1986.

- Kaufmann, P.; Fogarty, N.G.; Koppe, E.H.; Marques dos Santos, P.; Scalise Jr., E.; Schaal, R.E.; Tiba, T. Performance of the brazilian 45 ft Itapetinga radio telescope at K-and. *Revista Brasileira de Tecnologia*, 7(1):81-88, Mar. de 1976.
- Kaufmann, P.; Strauss, F.M.; Schaal, R.E.; Laporte, C. The use of mm-wave antenna at Itapetinga in high-sensivity solar research. *Solar Physics*, 78(1):389-399, June 1982.
- Kaufmann, P.; Correia, E.; Costa, J.E.R.; Sawant, H.S.; Zodi Vaz, A.M. The The simplest solar microbursts flux and circular polarization at 22 GHz. *Solar Physics*, 95(1):155-163, June 1985.
- Kaverin, N.S.; Kobrin, M.M.; Korshunov, A.I.; Shushunov, V.V. Fine structure of the S-component spectrum of the solar radio emission in the frequency range 5.0-7.0 GHz. *Solar Physics*, 63(1):379-388, May 1979.
- Kaverin, N.S.; Kobrin, M.M.; Korshunov, A.I.; Shushunov, V.V. Fine structure in the 5-12 GHz radio spectrum of local sources on the sun, and the current sheets of active regions. *Soviet Astronomy*, 24(4):442-443, July 1980.
- Klein, K.L. *Gyrosynchrotron radiation in an inhomogeneous medium*. (Tese de Doutorado) - Rheinischen Friedrich Wilhelms-Universitat, Bonn, 1984. 120p.
- 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. *Astrophys. J.*, 324(2):1118-1131, Jan 1988.
- Kraus, J.D. *Radio astronomy*. New York, McGraw Hill, 1966. 481 p.
- Kundu, M. *Solar radioastronomy*. New York, Interscience Publishers-John Wiley & Sons, 1965. 660 p.

- Kundu, M. High spatial resolution microwave observations of the sun. *Solar Physics*, 100(2):491-514, 1985.
- Martinazzo, D.; Rosa, R.R.; Neri, J.A.; Cecatto, J.R.; Fernandes, F.C.R.F. Sistema de processamento de dados para espectrômetro milimétrico solar. In: Congresso SBMAC, 16., Nova Friburgo, 1991. Resumos. Rio de Janeiro, Sociedade Brasileira de Matemática Aplicada e Computacional, 1991, p. 53.
- Melrose, D. **Plasma astrophysics - nonthermal processes in diffuse magnetized plasmas**. New York, Gordon/Breach, 1980. 269 p.
- Peterson, L.E; Winchler, J.R. Gamma ray bursts from a solar flare. *Journal of Geophysical Research*, 64(2):697-707, July 1959.
- Pick, M.; Klein, K.L.; Trotter, G. Meter-decimeter and microwave radio observations of solar flares. *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 73(1):165-175, June 1990.
- Pizzo, V.J. Numerical solution of the magnetostatic equations for thick flux tubes, with application to sunspots, pores, and related structures. *Astrophys. J.*, 302(4):785-808, Mar. 1986.
- Press, W.H.; Flannery, B.P.; Teukolsky, S.A.; Vetterling, W.T. **Numerical recipes - the art of scientific computing**. Cambridge, Cambridge University Press, 1988. 735 p.
- Ramaty, R. Gyrosynchrotron emission and absorption in a magnetoactive plasma. *Astrophys. J.*, 158(3):753-770, Nov. 1969.
- Romanelli, L.; Figliola, M.A.; Hirsch, F.A.; Radicella, S.M. Chaotic behavior of solar flux. *Solar Physics*, 110(2):391-395, June 1987.
- Rosa, R.R.; Cecatto, J.R.; Fernandes, F.C.R.; Sawant, H.S. Simple solar microwave bursts (23-18 GHz). In: Plasma Astrophysics Workshop, 2., São Paulo, 1991. Resumos. São Paulo, USP, 1991, p. 11.

- Sawant, H.S.; Cecatto, J.R. Fine structure in the mm-wavelength spectra of the active region. **Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica**, 21(1):552-556, Nov. 1990.
- Sawant, H.S.; Rosa, R.R.; Cecatto, J.R.C.; Fernandes, F.C.R. High spectral resolution of mm-wavelength (23-18 GHz) solar bursts. **Lectures Notes in Physics**, 339(1):367-368, June 1992.
- Sawant, H.S. Microwave and Associated X-ray observations of high spectral resolution and sensitivity. **XXIX Committee on Space Research - COSPAR**, Washington DC, Aug. 28 1992.
- Schoeshlin, W.; Magun, A. A statistical investigation of microwave burst spectra for the determination of source inhomogeneities. **Solar Physics**, 64(2):349-357, Nov 1979.
- Solar Geophysical Data Prompt Reports, Boulder, CO, NOAA, no 539(I) - 540(I), July, Aug. 1989.
- Solar Geophysical Data Comprehensive Reports, Boulder, CO, NOAA, no 544(II), Dec. 1989.
- Solar Geophysical Data Prompt Reports, Boulder, CO, NOAA, no 554(I), Oct. 1990.
- Solar Geophysical Data Comprehensive Reports, Boulder, CO, NOAA, no 554(II), Oct. 1990.
- Solar Geophysical Data Prompt Reports, Boulder, CO, NOAA, no 558(I), 561(I) e 562(I), Feb., May, June 1991.
- Stähli, M.; Gary, D.E.; Hurford, G.J. High resolution microwave spectra of solar bursts. **Solar Physics**, 120(2):351-368, Sept. 1989.
- Sturrock, P. Solar Flares Data from Skylab. In: Skylab Workshop on Solar Flares, 1., Bolder, 1980. **Proceedings of Skylab Workshop on Solar Flares**. Bolder, Colorado Assoc. Univ. Press, 1980, p. 8-10.

- Takakura, T.; Scalise Jr., E. Gyro-synchrotron emission in a magnetic dipole field for the application to the center-to-limb variation of microwave impulsive burts. *Solar Physics*, 11(3):434-455, Jun 1970.
- Takakura, T. The self absorption of gyro-synchrotron emission in a magnetic dipole field: microwave impulsive burst and hard X-ray burst. *Solar Physics*, 26(1):151-175, Nov 1972.
- Ulich, B.L.; Haas, R.W. Asolute calibration of millimeter-wavelenght spectral lines. *Astrophys. J. Suppl. Ser.*, 30(2):247-258, March 1976.
- Van Beek, H.F.; De Feiter, L.D.; De Jager, C. Hard X-ray oservation of elementary flare bursts and their interpretation. In: *Cospar Plenary Meeting, 16.*, Verlag, Berlim, 1974. *Proceedings of the open meetings of the working groups on physical sciences, Space Research, 14*, Berlim, Spring-Verlag, 1976. p. 447-452.
- Vieira, J.A. Semiotical analysis of photometrical signals. *An. Acad. Bras. Cienc.* 52(3):467-472, 1980.
- Vieira, J. A.; Machado, E.A.M. Estudo de possível processo caótico em "bursts" solares em 1,6 GHz. *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica*, 21(2):735, Nov 1990.
- Vlahos, L.; Machado, M.; Ramaty, R.; Murphy, R.J. Particle acceleration In: *Energetic Phenomena on the Sun*. Washington, DC, NASA, 1985. Kundu, M.; Woodgate, B., eds., 1986. p. 2-12. (NASA-CP2439).
- Wild, J.P.; McCready, L.L. Observations of the spectrum of high intensity solar radiation at metre wave lenghts. In: *the apparatus and spectral types of solar burst observed*. *Austral. J. Sci. Res.*, A3(3):387-398, Sept. 1950.

## APÊNDICE A

LEVANTAMENTO DA CORRELAÇÃO COM H $\alpha$  E MICROONDAS

Utilizando o periódico "Solar Geophysical Data", publicado pela *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), desenvolvemos uma coleta minuciosa das características dos *flares*, observados em H $\alpha$ , e dos *radiobursts*, observados em outras frequências de rádio, possivelmente correlacionados com as 25 explosões observadas na faixa de 18 a 23 GHz, selecionadas através dos critérios básicos mencionados no Capítulo 3.

Para os *flares* em H $\alpha$ , coletamos: a) o Tempo Universal de início do evento (TU<sub>i</sub>), de pico (TU<sub>p</sub>) e final (TU<sub>f</sub>); b) a *importância óptica* (IMP), cujos códigos estão dispostos na Tabela A.1; c) a localização no disco solar em coordenadas heliográficas e d) o campo magnético associado, cuja codificação está disposta na tabela A.2.

TABELA A.1 - CODIGOS PARA IMPORTÂNCIA OPTICA DO FLARE

Código	Significado
S	A < 2,0
1	2,1 < A < 5,1
2	5,2 < A < 12,4
3	12,5 < A < 24,7
4	A > 24,7
f	brilho fraco
n	brilho normal
b	brilhante

onde A é a área observada em unidades de graus quadrados. Exemplo de classificação: Sn = *flare* com A < 2,0 graus quadrados e com brilho normal.

TABELA A.2 - CÓDIGOS PARA O CAMPO MAGNÉTICO LOCAL

Código	Intensidade em Gauss
1	100 - 500
2	600 - 1000
3	1100 - 1500
4	1600 - 2000
5	2100 - 2500
6	2600 - 3000
7	3100 - 3500
8	3600 - 4000
9	4100 - 4500
10	> 4500

Para os *radiobursts*, observados em faixa espectral, coletamos o tipo da explosão (ver Figura 1.1 dessa dissertação) e a estação observadora (ver Tabela A.3). Nas frequências discretas coletamos, além da frequência de observação (em MHz), o Tempo Universal de início e pico (com a duração em minutos) e o fluxo medido em UFS.

Na tabela A.4 temos as 25 explosões, incluindo a data de observação, a região ativa (RA) rastreada e o Tempo Universal para o início, o pico e o final da explosão, além dos dados coletados no SGD como mencionados anteriormente.

TABELA A.3 - ESTAÇÕES OBSERVADORAS NAS FREQUÊNCIAS DE RÁDIO

CÓDIGO	LOCAL	COORDENADAS GEOGRÁFICAS		FREQUÊNCIA (MHz)
		LAT	LONG	
ATHN	Athens, Greece	38N	24E	3800, 4995, 2695, 1415
BERN	Berne, Switzerland	47N	07E	32500, 50000, 35000, 19600, 11800, 8400, 5200, 3100
BORD	Bordeaux, France	44N	03E	930
CRIM	Simferopol, USSR	44N	34E	3100
GORK	Gorky, USSR	56N	44E	9100, 2950, 950, 650, 200, 100
HIRA	Hiraiso, Japan	36N	140E	500, 200, 100
HUAN	Huancayo, Peru	12S	75W	9400
IZMI	Moscow IZMIRAN, USSR	55N	37E	204
KISV	Kislovodsk, USSR	43N	42E	15300, 6100
KRAK	Krakow, Poland	50N	19E	810, 430
LEAH	Leamonth, Australia	22S	114E	15400, 8900, 4995, 2695, 1415, 606, 410, 245
NOBE	Nobeyama, Japan	35N	139E	30000, 35000, 17000
ONDR	Ondrejov, Czechoslovakia	49N	14E	208, 536, 250
OTTA	Ottawa, Canada	45N	79W	2500
PALE	Palehua, Hawaii, USA	21N	158W	15400, 8800, 4995, 2695, 1415, 610, 410, 245
PEKG	Peking, People's Republic of China	40N	115E	3595, 2840
PENT	Penticton, Canada	49N	119W	2695
POTS	Potsdam, German Democratic Republic	52N	13E	9500, 3000, 1470, 234, 113, 68, 30
SAOP	Sao Paulo, Brazil	23S	46W	7000
SGMR	Sagamore Hill, Massachusetts, USA	42N	71W	15400, 8800, 4995, 2695, 1415, 609, 410, 245
SVTO	San Vito, Italy	41N	14E	15400, 8800, 4995, 2695, 1415, 610, 410, 245
TORN	Torun, Poland	53N	18E	127
TRST	Trieste, Italy	46N	14E	408, 327, 237
TYKW	Tsukuba, Japan	34N	139E	9400, 3750, 2000, 1000
UPIC	Ustica, Czechoslovakia	50N	16E	33, 29
VORO	Voroshilov, Maritime Territory, USSR	43N	132E	2030
YUNN	Yunnan, People's Republic of China	25N	103E	3553, 2902

EVENTO (18-23 GHz)				H $\alpha$ -FLARE (SGD)				RADIO BURSTS (SGD)						
DATA	RA	UT1	UT <sub>p</sub>	IN	MAX	FIN	IMP	REGIÃO ATIVA (LOCALIZ. / B)	OBSERV. ESPECTR. 1. IN-FIN 2. TIPO (EST.)		OBSERV. RADIOM.: 1. f em MHz (estação) 3. duração (min) 2. IN-FIN (UT) 4. Fluxo (SFU)			
14/6/89	5528	12:50	12:51	12:51		12:56	—	5528 (N14W01 / 5)	1.12:58.0-23:00.0 2.CONT.(SGMR)		1.2800(OTTA) 2.12:50-13:09 3.35; 4.8,5	1.5900(KISV) 2.12:50-12:52 3.-; 4.15,0	1.9300(KISV) 2.12:50-12:57 3.-; 4.15,0	
14/6/89	5528	16:55	16:56	16:53	16:56	17:14	SF	5528 (N21E00 / 5)	1.16:54-16:55	2.III(PALE)	1.245(PALE)		1.245(SVTO)	
				16:56	16:57	17:02	SF	(N15W04 / 5)	1.16:54-16:57	2.V(SGMR)	2.16:54-16:54		2.16:54-16:54	
									1.16:54-16:56	2.IIIG(WEISS)	3.1,0; 4.1200		3.1,0; 4.830	
14/6/89	5528	17:11	17:11	...			...	...	...		...			
15/6/89	5528	19:11	19:11	...			...	...	...		...			
18/6/89	5528	18:59	18:58	19:00	19:00	19:20	SN	5528 (N20W60 / 5)	...		1.15400(SGMR) 2.18:59-19:00 3.1,0; 4.250		1.8800(SGMR) 2.18:59-19:00 3.1,0; 4.280	
22/6/89	5555	14:02	14:03	13:53	14:36	16:19	SN	5555 (N25E46 / 6)	1.12:30-14:02	2.CONT(SVTO)	1.410(SGMR)	1.9300(KISV)	1.9500(POTS)	
									1.13:20-14:17	2.S(SVTO)	2.13:42-13:42	2.13:52-13:54	2.14:02-14:03	
											3.-; 4.77	3.4,7; 4.13	3.1,5; 4.11	
22/6/89	5555	14:41	14:40	14:44	14:45	15:20	SN	5555 (N27E50 / 6)	1.14:41-15:17	2.S(SVTO)	1.1470(POTS)	1.3000(POTS)	1.9500(POTS)	
									1.14:44-14:46	2.III(SGMR)	2.14:42-14:45	2.14:43-14:45	2.14:43-14:45	
									1.14:45-14:48	2.IIIGG(WEISS)	3.9,5; 4.35	3.12,0; 4.73	3.13,0 4.153	
28/6/89	5569	16:09	16:10	...			...	...	...		...			
28/6/89	5569	18:10	18:14	18:08	18:18	19:13	IN 2B	5569 (N20E03 / 5) (N19E05 / 5)	...		1.2800(OTTA)	1.4995(SGMR)	1.8800(PALE)	1.15400(SGMR)
											2.18:10-18:16	2.18:11-18:17	2.18:13-18:22	1.18:13-18:17
											3.15,5; 4.432	3.17,0; 4.440	3.13,0; 4.340	3.15,0; 4.100
30/6/89	5569	16:40	16:43	16:23	16:43	16:57	SN SF	5569 (N21W22 / 5) (N18W25 / 5)	...		1.600(HUMN)		1.610(SGMR)	
											2.16:31-16:43		2.16:42-16:43	
											3.31,0; 4.60		3.1,0; 4.83	
30/6/89	5569	16:45	16:47	16:23	16:43	16:57	SN SF	5569 (N21W22 / 5) (N18W25 / 5)	...		1.600(HUMN)		1.610(SGMR)	
											2.16:31-16:43		2.16:42-16:43	
											3.31,0; 4.60		3.1,0; 4.83	

TABELA A.4 - CORRELAÇÃO ENTRE AS EXPLOSÕES (18-23) GHz E  
OUTROS EVENTOS

EVENTO (18-23 GHz)				HX-FLARE (SGD)			RADIO BURSTS (SGD)					
DATA	RA	UT <sub>1</sub>	UT <sub>p</sub>	IN - MAX - FIN	IMP	REGIÃO ATIVA (LOCALIZ. / B)	OBSERV. ESPECTR. 1. IN-FIN 2. TIPO (EST.)		OBSERV. RADIOM.: 1. f em MHz (estação) 3. duração (min) 2. IN-FIN (UT) 4. fluxo (SFU)			
30/6/89	5569	17:20	17:21	17:17 17:22 17:27 17:19 17:22 17:34 17:20 17:22 17:28	SF SF SF	5569 (N20W27 / 5) (N18W24 / 5) (N20W24 / 5)	1.17:19-17:20 1.17:19-17:20	2.V(SGMR) 2.IIIG(WEISS)	1.2800(OITA) 2.17:37-17:38 3.3,0; 4.28	1.4995(SGMR) 2.17:37-17:37 3.1,0; 4.100	1.8800(SGMR) 2.17:37-17:37 3.10; 4.120	1.15400(SGMR) 2.17:37-17:37 3.1,0; 4.72
30/6/89	5569	17:43	17:43	17:37 17:47 18:16	SF	5569 (N21W24 / 5)	1.17:44-17:47 1.18:05-18:05	2.IIIGG(WEISS) 2.III(SGMR)	1.1415(SGMR) 2.17:46-17:46 3.-; 4.73		1.15400(SGMR) 2.17:46-17:46 3.-; 4.96	
30/6/89	5569	17:45	17:46	17:37 17:47 18:16	SF	5569 (N21W24 / 5)	1.17:44-17:47 1.18:05-18:05	2.IIIGG(WEISS) 2.III(SGMR)	1.1415(SGMR) 2.17:46-17:46 3.-; 4.73		1.15400(SGMR) 2.17:46-17:46 3.-; 4.96	
03/9/90	6233		13:40	13:39 13:40 13:51 13:40 13:40 14:05	SF SF	6233 (N15W57) (N18W58)	...		...			
15/5/90	6063	13:02	13:03	12:52 13:06 16:00 12:46 12:52 16:13	2B 2B	6063 (N36E36)	1.13:04-13:08 1.13:05-13:43	2.IIIG(WEISS) 2.IV(SGMR)	1.8900(SGMR) 2.13:00-13:06 3.6,5; 4.510	1.9500(POTS) 2.12:58-13:06 3.112; 4.500	1.15400(SGMR) 2.13:00-13:06 3.70; 4.340	
23/1/91	6466	13:03	13:03	....	....	....	....		....			
23/1/91	6466		14:37	14:33 14:42 14:49	SF	6466 (S10E50 / 4)	1.14:39-14:40 1.14:52-14:52	2.IIIB(WEISS) 2.IIIB(WEISS)			....	
24/1/91	6466	13:05	13:10	....	....	....	....		....			
24/1/91	6466	14:08	14:08	....	....	....	....		....			
24/1/91	6466	18:50	18:50	18:45 18:53 19:03	SF	S07W60 / 5	....		....			
17/4/91	6593	16:57	16:57	16:57 16:57 17:27 16:57 16:58 17:19	SF SF	6593 (S11E34 / 5) (S11E33 / 5)	1.16:45-17:51 1.17:08-17:10	2.CONT(SGMR) 2.IIIG(WEISS)			....	

TABELA A.4 - (CONT.)



## APÊNDICE B

## SOFTWARE PARA DIGITALIZAÇÃO DO SINAL (18-23 GHz)

O programa de aquisição PROCESS, escrito em PASCAL (Martinazzo et al., 1991), foi desenvolvido com capacidade de digitalizar até 25 minutos de sinal, resultando num arquivo de 360 kB. O programa foi aprimorado, pois o tempo de execução deveria ser minimizado, devido ao volume de dados a ser tratado. O programa PROC eliminou o tempo de transição de um canal para o outro, e fez uma integração dos valores considerados corretos.

Para melhorar a apresentação dos dados obtidos foi desenvolvido o programa AJUST, o qual ajusta, com um nível DC, os diversos canais, plotados assim num único gráfico. Este mesmo programa teve posteriormente a função de converter os valores de tensão, obtidos na digitalização, para valores em *UFS* (*unidades de fluxo solar*).

Desenvolvemos, posteriormente, os programas TEMP, que permite determinar o tempo TU (*Tempo Universal*) de cada evento, e o AUTPRO, que permite a digitalização em tempo real sincronizada com o tempo em UT e identifica explosões quando o nível do sinal ultrapassa três vezes o nível médio de ruído. Finalmente, a partir do programa PROC, desenvolvemos o programa PROC100 que reduz o tempo de processamento de 1,2 s para 0,6 s.

Todos os programas desenvolvidos foram transformados em *units* de um programa gerenciador: o MILIMET. Portanto, após essas compilações, obtivemos um software com as seguintes opções:

## A) DIGITALIZACAO

-em tempo real;

-executada a partir da saída do gravador AMPEX

## B) PROCESSAMENTO

-para resolução temporal de 1.2 s;

-para resolução temporal de 0.6 s;

-com conversão de unidade de tensão para SFU, conforme calibração;

-com entrada direta no programa *GRAPHER*;

-com determinação do tempo em UT, para dados não digitalizados em tempo real.

Este sistema basicamente nos fornece as seguintes vantagens:

- a) redução no tempo para processamento, pois os dados podem ser digitalizados em tempo real;
- b) maior imunidade ao ruído, pois evita-se os processos de gravação e reprodução das fitas, geradores de ruído e
- c) melhor qualidade e resolução gráfica para as explosões com estrutura fina em tempo e frequência.

#### *Descrição do Funcionamento do Programa*

O programa MILIMET gerencia todo o processo de aquisição e processamento de sinais do espectrômetro milimétrico (Martinazzo, 1991). Ao digitar o nome MILIMET é fornecido um menu com 6 opções:

- 1 - Aquisição
- 2 - Tratamento com resolução de 1,2 s
- 3 - Tratamento com resolução de 0,6 s
- 4 - Ajuste
- 5 - Gráfico
- 6 - Fim

Para acessar qualquer destas opções basta digitar o número correspondente. A função desempenhada por cada opção é:

1- **AQUISIÇÃO:** permite adquirir os dados em tempo real. Porém, é necessário que a placa digitalizadora PC-ADDA 12 esteja conectada em um dos slots do micro e na sua saída a placa de interface dos sinais, que possui três saídas devidamente identificadas (marca de frequência, marca de tempo e sinal de fluxo). A marca de tempo permite que seja feito o sincronismo entre o tempo UT e o relógio interno do micro computador, para isto, basta seguir as instruções do programa AUTPRO. Após este sincronismo os dados serão adquiridos automaticamente e, sempre que a intensidade do sinal recebido ultrapassar o nível pré definido, os dados serão gravados por um tempo de até 2 minutos após a queda do sinal.

2- **TRATAMENTO 1,2 s:** permite que um arquivo de dados do tipo *file of byte* seja processado e convertido em arquivo compatível com o programa *grapher*. Para esta opção os dados tratados são os que foram adquiridos com a resolução temporal de 1,2 s. Como entrada do programa devem ser dados o nome do arquivo (*file of byte*) de dados digitalizados. Para a saída teremos 3 arquivos com as seguintes denominações: \*\*\*\*-12.dat;

\*\*\*\*-34.dat e \*\*\*\*-56.dat. Cada um contendo 4 colunas, sendo a primeira e terceira de tempo (em relação ao tempo inicial) e a segunda e quarta de intensidade do sinal para 18, 19, 20, 21, 22 e 23 GHz.

3- **TRATAMENTO 600 ms:** similar ao tratamento para 1,2 s, porém destinados aos dados obtidos com resolução temporal de 600 ms.

4- **AJUSTE:** esta opção chama o programa AJUST que tem como entrada os arquivos de saída das opções 2 ou 3, e permite que seja feita a conversão de unidades de tensão para unidades de fluxo solar (SFU). Além da conversão de unidades, esta opção permite que seja feito um deslocamento das curvas para que possam ser plotadas num único gráfico, a fim de comparação.

5- **GRÁFICOS:** esta opção chama o programa *grapher* que deve ter como entradas os arquivos de saída das opções 2, 3 ou 4, e desta forma podem ser mostrados num monitor e plotados em impressoras.

6- **FIM:** esta opção termina a execução do MILIMET.

#### *Considerações sobre as barras de erro nos perfis temporais digitalizados*

A barra de erro para o tempo é de 100 ms, uma vez que a varredura dos pontos, para gerar o sinal digitalizado, é feita a cada 25 ms, gerando um ponto digitalizado para cada quatro pontos analógicos.

Quando observamos uma fonte com temperatura de brilho bem conhecida (por exemplo as fontes calibradoras *Orion*, *Jupiter* e *Virgo A*) notamos que o sinal medido pode apresentar uma flutuação de até 20 %. Essa "barra de erro" é resultante de um ruído aleatório do radiômetro e é considerada como a barra de erro para os valores da densidade de fluxo medidos e corrigidos para Unidades de Fluxo Solar.



## APÊNDICE C

## AJUSTE DA MELHOR RETA PARA O ESPECTRO NA FAIXA DE 18 A 23 GHz

Os espectros para as explosões solares, observadas na faixa de 18 a 23 GHz, foram definidos como a melhor reta ajustada à distribuição dos pontos num gráfico de log da densidade de fluxo (log S) versus a frequência f. Para o ajuste desta reta utilizamos a subrotina "Fitting Data to a Straight Line" em Fortran, do *NUMERICAL RECIPES* (Press et al., 1987).

Este programa fornece diretamente os desvios padrão tanto para as variáveis como para as constantes envolvidas na equação da reta. Isso nos possibilitou obter os valores dos desvios para os coeficientes angulares dos espectros, que são interpretados como os índices espectrais  $\beta$ .

Uma vez que  $\log S = a + b \log f$ , teremos como resultado do ajuste,

$$\log S_1 = (a \mp \sigma_a) + (b \mp \sigma_b) \log f_1 \quad (\text{C.1})$$

e

$$\log S_2 = (a \mp \sigma_a) + (b \mp \sigma_b) \log f_2 \quad (\text{C.2})$$

tal que,

$$\log S_2/S_1 = (b \mp \sigma_b) \log f_2/f_1 \quad (\text{C.3})$$

portanto

$$b \mp \sigma_b = [\log(S_2/S_1) / \log(f_2/f_1)] \quad (\text{C.4})$$

que corresponde à equação de  $\beta$  introduzida no Capítulo 3 desta Dissertação.

Os valores obtidos para os dezesseis espectros calculados estão dispostos na Tabela C.1, onde aparecem os valores para as constantes A, B ( $= \beta$ ) e para os seus respectivos desvios  $s_a$  e  $s_b$  ( $= \Delta\beta$ ).

TABELA C.1 - VALORES OBTIDOS A PARTIR DA SUBROTINA

## "FITTING DATA TO A STRAIGHT LINE"

i= 1	A= 2,22	B= 1,29	sa= 0,73	sb= 0,56
i= 2	A= 4,17	B= -2,67	sa= 0,68	sb= 0,52
i= 3	A= 2,41	B= -1,30	sa= 0,79	sb= 0,60
i= 4	A= 3,07	B= -1,81	sa= 0,28	sb= 0,21
i= 5	A= 3,33	B= -2,07	sa= 0,80	sb= 0,61
i= 6	A= 3,80	B= -2,54	sa= 0,73	sb= 0,56
i= 7	A= 3,58	B= -2,23	sa= 0,55	sb= 0,42
i= 8	A= 3,10	B= -2,00	sa= 0,34	sb= 0,26
i= 9	A= 2,59	B= -0,51	sa= 0,53	sb= 0,40
i=10	A= 3,45	B= -1,57	sa= 0,18	sb= 0,14
i=11	A= 7,99	B= -4,77	sa= 0,24	sb= 0,19
i=12	A= 5,96	B= -3,59	sa= 0,56	sb= 0,43
i=13	A= 7,30	B= -5,13	sa= 0,62	sb= 0,47
i=14	A= 3,90	B= -1,94	sa= 0,22	sb= 0,17
i=15	A= 5,55	B= -3,24	sa= 1,14	sb= 0,87
i=16	A= 7,14	B= -4,21	sa= 0,35	sb= 0,26