

## **Explosões solares em ondas milimétricas (18-23 GHz): tratamento e análise de dados**

Eliana Soares de Andrade

Aluna da Universidade do Vale do Paraíba - Bolsa PIBIC/CNPq

Orientador: Dr. H. S. Sawant, Pesquisador da Divisão de Astrofísica  
INPE, Av. dos Astronautas, 1758 - C.P. 515

Explosões solares são fenômenos que ocorrem nas regiões ativas solares - regiões de relativamente altos valores de densidade, campo magnético e temperatura comparados aos valores do meio ambiente circundante - estando normalmente associadas às chamadas fulgurações ("flares") solares. Estes fenômenos se manifestam pela liberação de grande quantidade de energia ( $10^{24}$  -  $10^{32}$  erg) num amplo espectro, desde ondas de rádio kilométricas até raios-X e raios- $\gamma$ , apresentam uma duração relativamente curta, de 1-2 minutos a  $\leq 2$  horas. As explosões podem apresentar até 3 fases: pré-fulguração, impulsiva e gradual. A maioria (90%) das explosões solares apresenta fase impulsiva, que pode ocorrer após a fase pré-fulguração, caracterizada pelo rápido aumento do fluxo em rádio, raios-X duros e H- $\alpha$  com uma duração de até 5-10 min. Nesta fase, a energia das partículas emissoras é de 100-300 keV (Sawant et al, 1993). Nesta investigação tratamos apenas com a fase impulsiva das explosões.

O disco solar possui um tamanho de 30' de arco, o feixe da antena 4' de arco e regiões ativas um tamanho  $< 1'$  de arco. Portanto, a identificação no disco e determinação das coordenadas da região ativa a ser observada necessita da realização do mapa solar em rádio. O mapa é feito através de varreduras cobrindo o disco solar inteiro, utilizando a antena de 13.7 m de diâmetro do Rádio Observatório do Itapetinga (Atibaia) que opera em conjunto com o Receptor de Frequência Variável (18-23 GHz), na frequência de melhor resposta da corneta utilizada, nesse caso 22 GHz (Sawant e Cecatto, 1994; Cecatto, 1991).

Esta investigação é baseada em dados de explosões solares simples. Com os perfis temporais em todas as 6 frequências (18-23 GHz) de observação, as explosões foram classificadas como simples - as explosões que apresentam uma única estrutura em tempo e com um fluxo de pico  $\leq 50$  U.F.S. (Unidades de Fluxo Solar) - ou complexas. Para as explosões simples, determinamos os tempos de início, de pico - máximo de emissão - e do término da explosão, e tempos subida e de decaimento como pode ser visto na Figura 1. Os tempos de início e término das explosões foram tomados como correspondendo ao nível 1/e do nível de fluxo de pico, respectivamente durante a subida e decaimento do fluxo. O tempo de subida é medido como o intervalo de tempo entre o tempo de início e o tempo de pico, enquanto que o tempo de decaimento é o intervalo entre este último e o tempo do término da explosão. Utilizando-se esses dados as explosões são classificadas e publicadas em um catálogo para divulgação internacional.

Em seguida, foram construídos os espectros (curva de fluxo versus frequência) para a explosão e determinados os correspondentes índices espectrais - inclinação da reta de ajuste pelo método dos mínimos quadrados para os pontos de fluxo em função da frequência dispostos num gráfico em escala di-logaritmica.

Utilizando-se os parâmetros determinados para a explosão descritos acima e as fórmulas dadas na literatura para cálculo do espectro podemos estimar

**PROGRAMA INSTITUCIONAL DE BOLSAS DE INICIAÇÃO  
CIENTÍFICA - PIBIC/CNPq - INPE**

**RELATÓRIO FINAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA  
JULHO DE 1996 A JUNHO DE 1997**

**TÍTULO DO PROJETO : Tratamento e análise de dados do Receptor de  
Frequência Variável e observações solares com Espectrógrafo Digital Decimétrico de  
Banda Larga.**

**BOLSISTA :**



**ELIANA SOARES DE ANDRADE**

**ORIENTADOR :**

---

**DR. HANUMANT SHANKAR SAWANT**

**CONTEÚDO**

<b>1 - INTRODUÇÃO.....</b>	<b>3</b>
<b>2 - INSTRUMENTAÇÃO E MÉTODO OBSERVACIONAL .....</b>	<b>4</b>
<b>3 - EXPLOSÕES SOLARES : CARACTERÍSTICAS,CLASSIFICAÇÃO E METODOLOGIA PARA TRATAMENTO DE DADOS.....</b>	<b>5</b>
<b>4 - ANÁLISE DE DADOS E DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS FÍSICOS PARA AS FONTES EMISSORAS .....</b>	<b>9</b>
<b>5 - CONCLUSÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>6 - REFERÊNCIAS .....</b>	<b>11</b>

## 1 - Introdução

Este é o relatório final de Iniciação Científica referente ao período Julho de 1996-Junho de 1997. As seguintes atividades da bolsista foram desenvolvidas junto à Linha de Pesquisa de Física do Meio Interplanetário (FMI) da Divisão de Astrofísica do INPE, em São José dos Campos.

1 - A bolsista participou nas campanhas diárias de observações solares com o Espectrógrafo Digital Decimétrico de Alta Resolução e Banda Larga que opera no INPE em São José dos Campos. Basicamente efetuou o controle e acompanhamento do rastreamento da antena, participou das calibrações de frequência e intensidade no analisador espectral, no preparo e acompanhamento do funcionamento do sistema ótico de coleta dos dados e na revelação do filme resultante da observação.

2 - Participou também no tratamento e análise preliminar de dados de explosões solares observadas com esse instrumento.

3 - Além disso, a bolsista participou no tratamento e análise de dados detalhados de explosões solares observadas com altas resoluções espectral (1 GHz) e temporal (0,6 s) em ondas milimétricas (18-23 GHz) pelo Receptor de Frequência Variável (RFV) que opera em conjunto com a antena de 13.7 m de diâmetro do Rádio Observatório do Itapetinga (em Atibaia, SP).

4 - Para isso, construiu os perfis temporais das explosões nas 6 frequências de observação e determinou o fluxo de pico em 22 GHz. A partir disso, as explosões foram classificadas em simples ou complexas. Para as explosões simples foram determinados os tempos de início, pico e término da explosão, e tempos de subida e decaimento.

5 - Em seguida, foi construído o espectro (18-23 GHz) para o instante de pico e determinados os valores do índice espectral durante toda a explosão obtendo-se assim a evolução temporal do espectro.

6 - Utilizando os parâmetros determinados para as explosões e fórmulas da literatura a bolsista estimou os parâmetros físicos ( $B$ ,  $N_e$ ,  $E_e$ ,  $N_T$  e  $E_T$ ) para as fontes emissoras.

A seguir são apresentadas as características do RFV, o método observacional e de coleta de dados, o critério para a classificação das explosões, a determinação das características destas, o processo de construção do espectro com determinação do índice espectral e a metodologia para estimativa dos parâmetros físicos da fonte emissora.

## 2 - Instrumentação e método observacional

O instrumento utilizado para a observação das explosões foi o Receptor de Frequência Variável (RFV) que opera dentro da faixa 18-23 GHz com alta sensibilidade (0,03-0,06 U.F.S.) e altas resoluções espectral (1 GHz) e temporal (0,6-1,2 s) em conjunto com a antena de 13.7 m de diâmetro do Rádio Observatório do Itapetinga, em Atibaia, S.P (Cecatto, 1991; Sawant e Cecatto, 1994). Na Figura 1 podemos ver o diagrama de blocos simplificado deste instrumento.

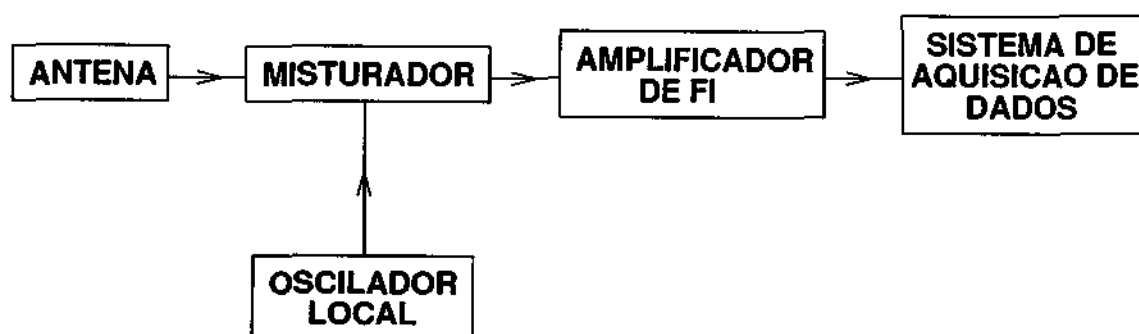


Fig. 1 - Diagrama de blocos simplificado do Receptor de Frequência Variável que opera com a antena de 13.7 m do Rádio Observatório do Itapetinga.

Devido ao fato do disco solar possuir um diâmetro (30' de arco) bem maior que a largura de feixe da antena (4' de arco) há necessidade de um procedimento para a localização da posição e determinação das coordenadas das regiões ativas presentes no disco. Esse procedimento é o mapa solar em rádio (22 GHz) que consiste de varreduras sucessivas do disco no sentido leste-oeste e vice-versa cobrindo desde o limbo norte até o sul do disco. Um programa traça as curvas de intensidade no disco obtendo-se assim uma imagem do Sol em ondas de rádio e a determinação da posição heliográfica e coordenadas das regiões ativas, como pode ser visualizado na Figura 2.

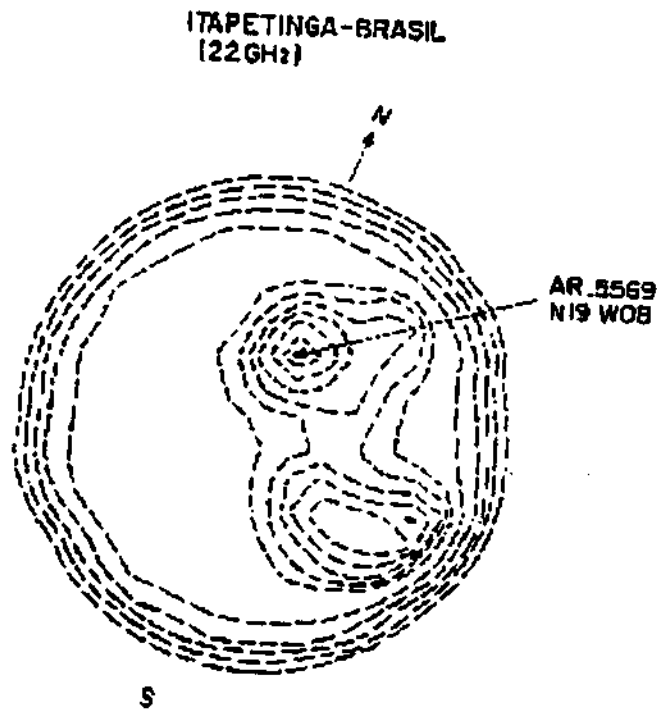


Fig. 2 - Mapa solar em rádio (22 GHz) para o dia 29/06/89 em formato analógico. Cada linha tracejada corresponde a um nível de intensidade da emissão em 22 GHz. A seta indica a posição da região ativa no disco.

Determinadas as coordenadas da região ativa escolhida para as observações a antena é apontada naquela direção e a região ativa é acompanhada registrando-se as possíveis explosões solares que venham a ocorrer naquela região ativa.

### **3 - Explosões solares: características, classificação e metodologia para tratamento de dados**

Explosões solares são fenômenos que ocorrem nas regiões ativas solares - regiões que se caracterizam pelos valores relativamente altos de densidade, campo magnético e temperatura comparados aos valores do meio ambiente circundante - estando normalmente associadas às chamadas fulgurações ("flares") solares. Estes fenômenos se manifestam pela liberação de grande quantidade de energia ( $10^{24}$  -  $10^{32}$  erg) num amplo espectro, desde ondas kilométricas em rádio até raios-X e raios- $\gamma$ , apresentam uma

duração relativamente curta, de poucos minutos a  $\leq 2$  horas. As explosões podem apresentar até 3 fases: pré-fulguração, impulsiva e gradual. A maioria (90%) das explosões apresentam fase impulsiva, que pode ocorrer após a fase pré-fulguração, caracterizada pelo rápido aumento do fluxo em rádio, raios-X e H- $\alpha$  com uma duração de até 5-10 min. Durante esta fase, a energia das partículas emissoras é de 100-300 keV (Sawant et al, 1993; Cecatto, 1996). Neste trabalho tratamos apenas com dados da fase impulsiva das explosões.

Foi construído o perfil temporal - curvas de fluxo versus tempo - das explosões nas 6 frequências de observação. As explosões foram classificadas em simples ou complexas de acordo com o seguinte critério: as explosões apresentando pico único com fluxo de pico  $\leq 50$  unidades de fluxo solar (U.F.S. daqui em diante) foram classificadas como explosões simples e as demais como complexas. Neste trabalho, são tratadas apenas explosões simples. Para essas explosões foram determinados: fluxo de pico, tempos de início, de pico e término da explosão e tempos de subida e decaimento. O fluxo de pico corresponde ao valor do fluxo para o instante do máximo de emissão ( $t_{\text{pico}}$ ) e foi tomado em 22 GHz. Em seguida determina-se os instantes correspondentes ao nível 1/e do fluxo de pico, o tempo de início ( $t_i$ ) corresponde ao instante onde o nível é 1/e do pico tomado antes deste enquanto o tempo de término ( $t_f$ ) é aquele correspondente ao mesmo nível tomado após o pico. O intervalo  $t_i-t_{\text{pico}}$  determina o tempo de subida e o intervalo  $t_{\text{pico}}-t_f$  o tempo de decaimento. A Figura 3 ilustra a obtenção das características das explosões simples.

Em seguida foi construído o espectro - curva de fluxo versus frequência - tomado num gráfico em escala di-logarítmica para o instante de pico da explosão e determinado o índice espectral correspondente. O índice foi determinado tomando-se a inclinação da reta de ajuste do espectro, obtida pelo método dos mínimos quadrados para uma lei de potência como pode ser visto na Figura 4. Um gráfico do índice espectral calculado durante toda a explosão fornece a evolução temporal do espectro para aquela explosão.

Na Figura 5 podemos ver um exemplo de resultado obtido no tratamento de dados exibindo os perfis temporais (18-23 GHz) de uma explosão simples, seu espectro para o instante do pico e a evolução temporal deste.

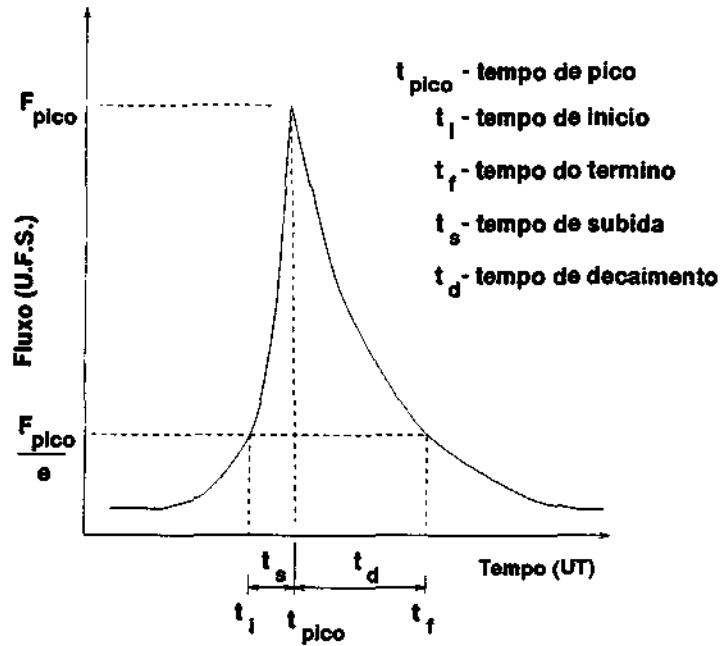


Fig. 3 - Características observacionais das explosões simples apresentando a metodologia para determinação do fluxo de pico, dos tempos de início, pico e término da explosão e dos tempos de subida e decaimento.

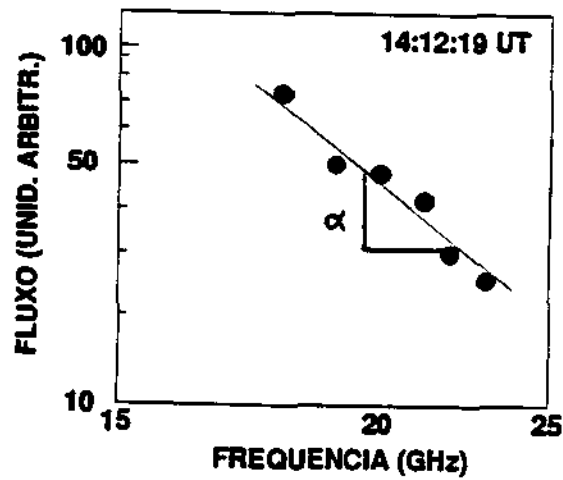


Fig. 4 - Espectro típico para o instante de pico ilustrando a metodologia para a determinação do índice espectral ( $\alpha$ ).



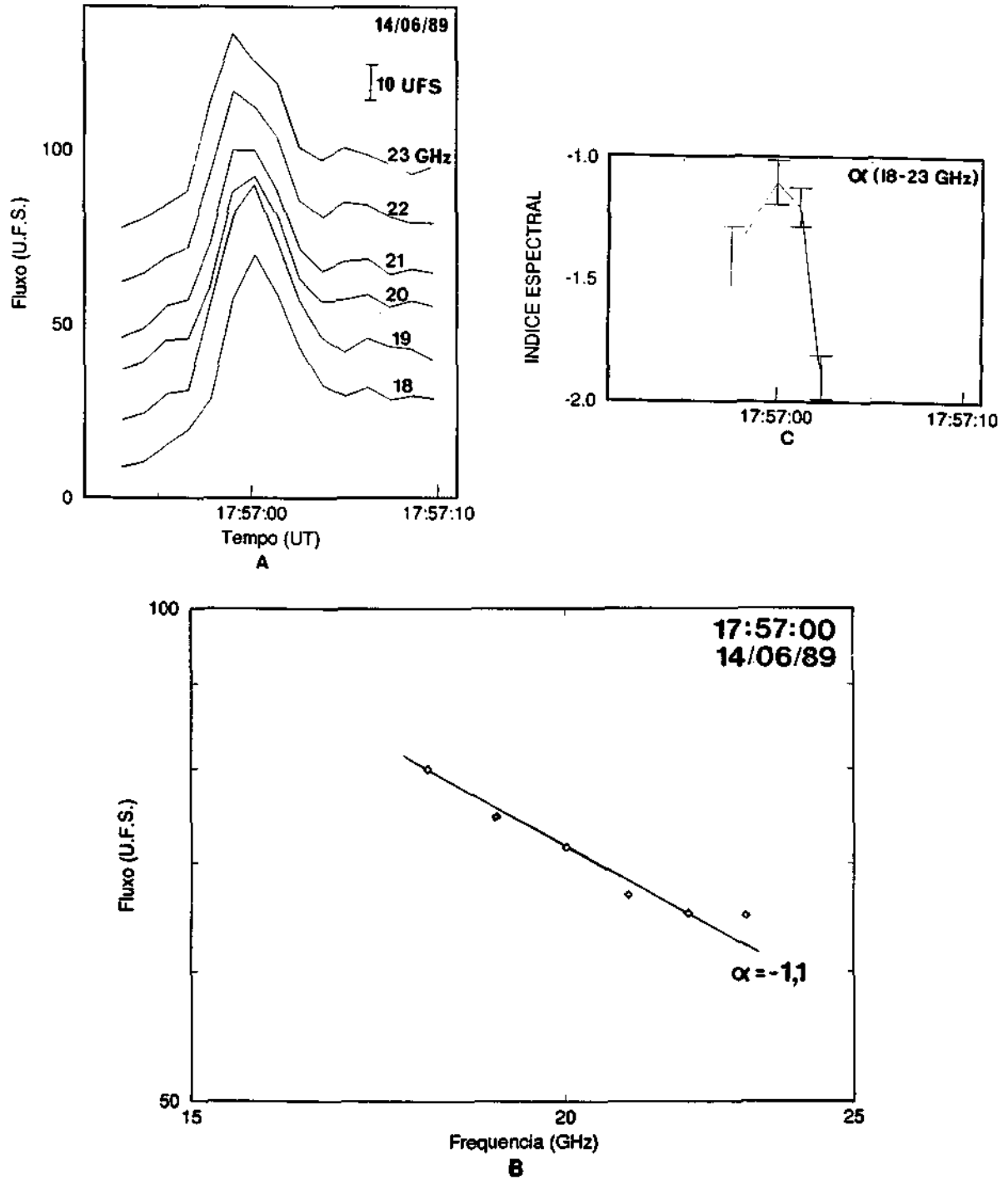


Fig. 5 - (a) Perfis temporais (18-23 GHz) para a explosão solar simples observada no dia 14/ 06/ 89 ; (b) espectro para o instante de pico desta explosão (17:57:00 UT); (c) evolução temporal do espectro durante a explosão.

#### 4 - Análise de dados e determinação dos parâmetros físicos para as fontes emissoras

Tomando-se os valores obtidos para o tempo de subida, fluxo de pico e índice espectral, bem como a evolução temporal deste, podemos fazer uma estimativa dos parâmetros físicos (campo magnético, altura, energia média e número total dos elétrons emissores e energia total destes) da fonte emissora, utilizando as fórmulas dadas na literatura (Dulk, 1985). O procedimento para fazer esta estimativa é descrito de forma simplificada a seguir.

Inicialmente determinamos o índice espectral da distribuição em energia dos elétrons emissores ( $\delta$ ) a partir do valor calculado para o índice espectral opticamente fino ( $\alpha$ ) do espectro em microondas através da relação:

$$\alpha = 1,22 - 0,90 \cdot \delta$$

A partir das coordenadas da fonte no disco ( $\theta$ ), da frequência de observação ( $f$ ), do valor de  $\delta$  e do valor assumido para o parâmetro NL podemos estimar o campo magnético:

$$B \propto f, \theta, \delta, NL$$

A energia média dos elétrons emissores é obtida pela seguinte relação, utilizando também o valor estimado para o campo magnético ( $B$ ):

$$E_e \propto f, \theta, \delta, B$$

O número total ( $N_T$ ) de elétrons emissores na fonte, tomando também o valor do fluxo de pico ( $F_{pico}$ ), é obtido por:

$$N_T \propto \theta, \delta, B, F_{pico}$$

Quanto à energia total dos elétrons emissores na fonte esta é obtida considerando a energia de corte inferior do espectro ( $E_0 \approx 10\text{-}25$  keV) e o número total de elétrons emissores na fonte:

$$E_T \propto E_0, \delta, N_T$$

A densidade foi estimada a partir do valor tomado na literatura para o parâmetro NL (dentro da faixa  $10^{17}$  -  $10^{20}$   $\text{cm}^{-2}$ , pois a dependência com NL é relativamente pequena) e considerando as dimensões típicas para a fonte emissora ( $L \sim 10^8$  -  $10^9$  cm).

A tabela 1 apresenta os resultados obtidos para estas estimativas (Cecatto, 1996; Sawant et. al, 1997).

**TABELA 1 - PARÂMETROS FÍSICOS ESTIMADOS PARA AS FONTES EMISSORAS DE EXPLOSÕES SOLARES SIMPLES EM 18-23 GHz.**

Expl. N°	B (G)	$\bar{T}_{eff}$ (KeV)	$N_e$ ( $\text{cm}^{-3}$ )	$N_T$	$E_T$ (erg)
1	240 - 760	150	$2 \cdot 10^8$ - $5 \cdot 10^{10}$	$1 \cdot 10^{36}$	$2 \cdot 10^{27}$
2	630 - 780	150	$2$ - $5 \cdot 10^{10}$	$2 \cdot 10^{34}$	$7 \cdot 10^{25}$
3	430 - 780	207	$5 \cdot 10^9$ - $5 \cdot 10^{10}$	$1 \cdot 10^{34}$	$7 \cdot 10^{25}$
4	150 - 810	270	$10^8$ - $5 \cdot 10^{10}$	$6 \cdot 10^{33}$	$4 \cdot 10^{25}$
5	380 - 860	190	$5 \cdot 10^8$ - $10^{10}$	$2 \cdot 10^{33}$	$2 \cdot 10^{25}$
6	600 - 870	110	$8 \cdot 10^9$ - $4 \cdot 10^{10}$	$2 \cdot 10^{34}$	$7 \cdot 10^{25}$
7	380 - 860	190	$5 \cdot 10^8$ - $10^{10}$	$4 \cdot 10^{33}$	$3 \cdot 10^{25}$
8	450 - 820	140	$4 \cdot 10^9$ - $5 \cdot 10^{10}$	$7 \cdot 10^{33}$	$3 \cdot 10^{25}$
9	200 - 740	120	$10^8$ - $5 \cdot 10^{10}$	$4 \cdot 10^{35}$	$6 \cdot 10^{26}$
10	160 - 660	160	$10^7$ - $2 \cdot 10^9$	$3 \cdot 10^{33}$	$2 \cdot 10^{25}$
11	510 - 830	80	$5 \cdot 10^9$ - $5 \cdot 10^{10}$	$2 \cdot 10^{36}$	$4 \cdot 10^{27}$

## 5 - Conclusão

As investigações de explosões solares simples observadas em microondas pelo RFV contribuíram para:

a) melhoria na precisão das medidas do espectro opticamente fino ( $f > f_{\text{pico}}$ ) e determinação de seu índice espectral correspondente, melhorando a informação a respeito da distribuição em energia dos elétrons emissores;

b) identificação do processo de energização dos elétrons emissores em explosões simples através da medida do tempo de subida e da evolução temporal do índice espectral;

c) estimativa dos parâmetros físicos para as fontes emissoras das explosões simples melhorando a modelagem destas.

## 6 - Referências

Cecatto, J.R. Tese de Mestrado, INPE-5371-TDI/470, 1991.

Cecatto, J.R. Tese de Doutorado, INPE-6126-TDI/587, 1996.

Dulk, G.A. *Ann. Rev. Astron. & Astrophys.*, 23:169, 1985.

Sawant, H.S.; Cecatto, J.R.; Dennis, B.R.; Gary, D.E.; Hurford, G.J. *Adv. Space Res.*, 13(9):199, 1993.

Sawant, H.S.; Cecatto, J.R. *Sol. Phys.* 150:375, 1994.

Sawant, H.S.; Rosa, R.R.; Cecatto, J.R.; Gopalswamy, N. *Sol. Phys.*, 171:155, 1997.